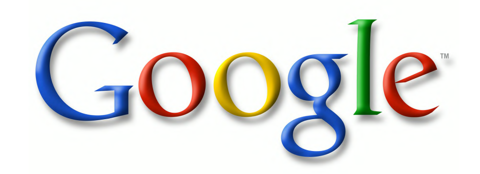
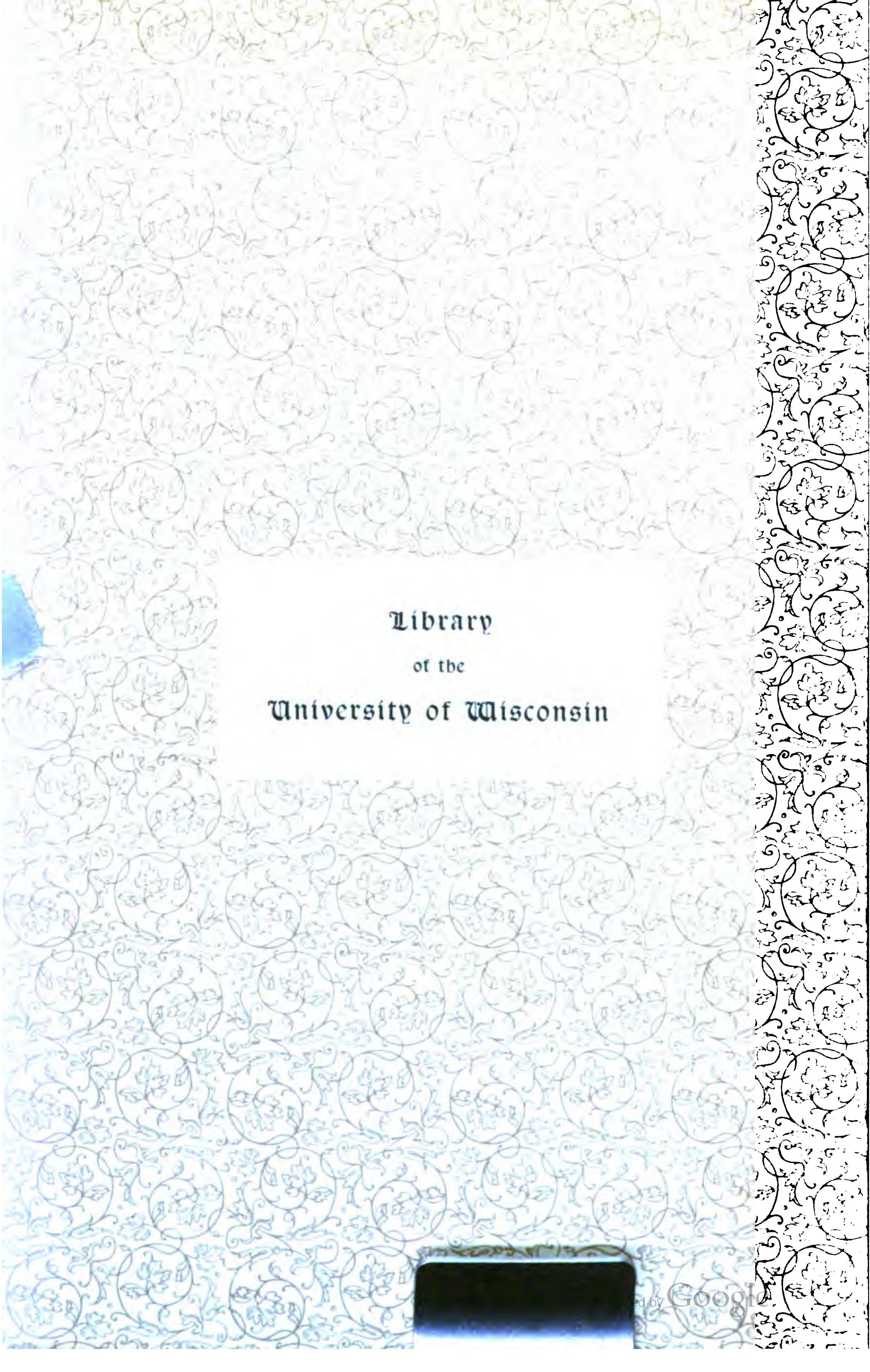
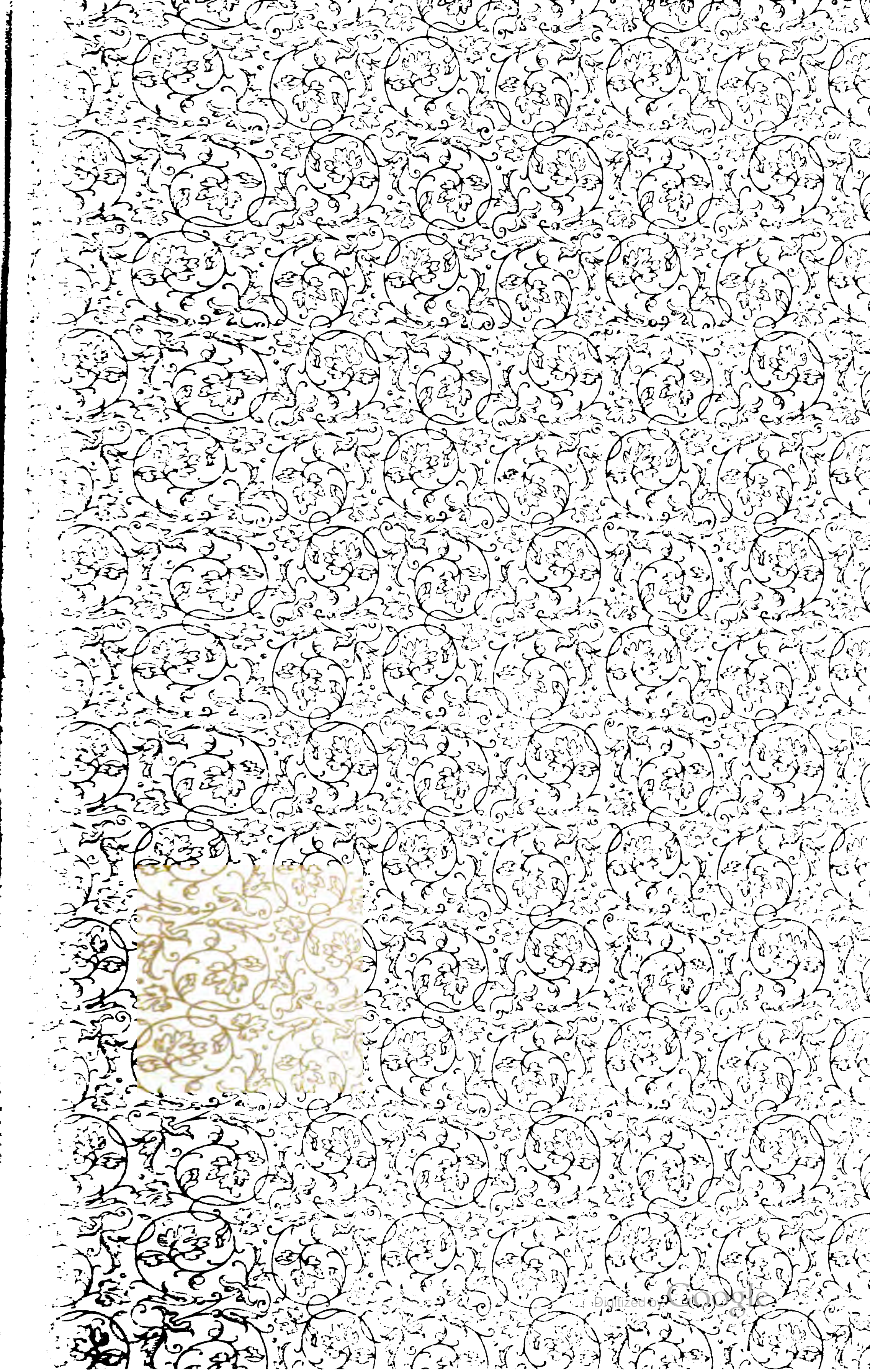






Library
of the
University of Wisconsin



SAMMLUNG

Elektrotechnischer Vorträge.

Unter Mitwirkung von

Prof. E. Arnold-Karlsruhe, Direktor Dr. Corsepius-Dresden, Direktor Einbeck-Berlin, Ingenieur C. P. Feldmann-Köln-Ehrenfeld, Prof. Dr. K. Feussner, Mitglied der physikal.-technischen Reichsanstalt, Oberingenieur Görling-Nürnberg, Ingenieur A. Heyland-Charleroi, Prof. Dr. Heinke-München, Chefelektriker J. Heubach-Köln, Geheimrat Prof. Dr. E. Kittler-Darmstadt, Oberingenieur L. Kohlfürst-Kaplitz, Direktor Nerz-Nürnberg, Prof. Dr. Niethammer-Brünn, Prof. Dr. G. Roessler-Berlin, Elektroingenieur Alex Rothert-Nancy, Dr. P. Schoop-Pfronten, Ingenieur Ch. P. Steinmetz-Schenectady, Baurat F. Uppenborn-München, Prof. H. F. Weber-Zürich, Prof. Dr. W. Wedding-Berlin

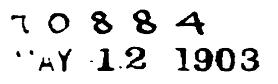
herausgegeben von **Prof. Dr. ERNST VOIT.**

III. BAND.

Mit 281 Abbildungen und 24 in den Text gedruckten Tafeln.

STUTTGART.
VERLAG VON FERDINAND ENKE.
1902.

Druck der Union Deutsche Verlagsgesellschaft in Stuttgart.



Inhaltsverzeichnis.

Beitrag zur Vorausberechnung und Untersuchung von Ein- und Mehrphasenstromgeneratoren.

Von

E. Arnold und J. L. la Cour,

Karlsruhe, Elektrotechnisches Institut der technischen Hochschule.

Mit 87 Abbildungen.

I. Kapitel.

Theorie der Feldverteilung im Luftzwischenraume.

Die in der Wicklung einer Wechselstrommaschine induzierte E.M.K. E_a kann man immer ausdrücken wie folgt:

$$E_a = 4 \cdot k \cdot c \cdot w \cdot Z_{max} \cdot 10^{-8}.$$

In allen nachfolgenden Betrachtungen wird bei der Berechnung von Z_{max} immer eine Windung angenommen, deren Weite (y) gleich der Polteilung $\tau = \frac{\pi D}{2p}$ ist. Es bedeutet dann Z_{max} die Hälfte der totalen Kraftflussvariation in der Fläche einer Windung ($y = \tau$) während einer halben Periode. Bei einer Wechselpoltype ist Z_{max} zugleich der maximale Kraftfluss, der pro Pol in die Armatur eintritt, $c = \frac{p \cdot u}{60}$ die Periodenzahl, w die in Serie geschalteten Windungen, k ein Faktor, der von der Form der Wicklung und der Form der Feldintensitätskurve abhängt.

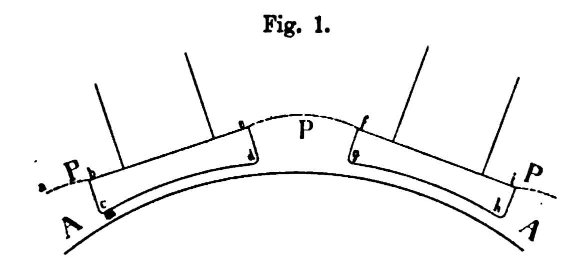
Der Faktor k ist von G. Kapp für verschiedene Verhältnisse ermittelt worden. Wenn wir in der nachfolgenden Arbeit diesen Faktor von neuem berechnen, so geschieht es deshalb, weil eine genauere Berechnung der Feldintensitätskurve, die G. Kapp der Einfachheit

wegen nicht durchgeführt hat, zu anderen Werten von k, die bis zu 10 % von den Kappschen abweichen, führt.

In der Theorie des Magnetismus unterscheidet man oft zwischen den Induktionslinien, den sogenannten B-Linien, und den wirklichen magnetischen Kraftlinien, den H-Linien. In einem magnetischen Kreislauf ist aber die Anzahl der H-Linien in allen Querschnitten desselben nicht dieselbe, sondern es ist nur die Anzahl der totalen Linien konstant, weil die Normalkomponente der magnetisierenden Kraft H_n ihre Grösse durch Uebergang von einem Medium zu einem anderen ändert. Um die magnetischen Probleme trotz dieser Unkontinuität der H-Linien mathematisch behandeln zu können, denkt man sich an den Stellen der Grenzschichten zweier Körper magnetische Belegungen angebracht, wo Linien aus- und eintreten.

Diese magnetischen Flächenbelegungen sind mit positivem Vorzeichen (Nordmagnetismus), wo die Linien aus einem Medium mit

Fig. 1.



grösserer Permeabilität, z. B. Eisen, austreten, und mit negativem Vorzeichen (Südmagnetismus) zu belegen, wo die Linien in einem Medium mit grösserer Permeabilität eintreten; die Belegungen heisst man magnetische Pole.

Wie bekannt, kann man oft mit Hilfe von Potentialen die magnetischen Kräfte in irgend einem Raume erklären. Diese Potentiale setzen sich gewöhnlich aus zwei Teilen zusammen, nämlich 1. aus den elektromagnetischen, die oft ersetzt werden können durch Potentiale magnetischer Belegungen von Flächen P, welche die sogenannten Wirbelräume umschliessen, und 2. aus den Potentialen magnetischer Flächenbelegungen, die man sich in den Grenzflächen A der verschiedenen Medien angebracht denken muss.

Dieses Bild ziehen wir heran, um dadurch die Feldintensität an der Oberfläche der Armatur einer Dynamomaschine als Funktion des Ortes darzustellen und zwar bei Leerlauf, wo die Armatur stromlos ist; ferner betrachten wir zuerst einen glatten Anker.

Die obengenannte Fläche P müssen wir uns in diesem Falle der Polschuhoberfläche entlang verlaufend und dann von einem Polschuheck zum anderen sich einer magnetischen Niveaufläche anschmiegend denken; der Linienzug a b c d e f g h i (Fig. 1) stellt die Schnittlinie dieser Fläche mit der Papierebene dar. Würde man jetzt die magnetischen Belegungen dieser Fläche P, welche für den Aussenraum ein Bild der magnetischen Kraft der Feldspulen darstellen, kennen, so könnte man in verhältnismässig einfacher Weise die magnetische Kraft gleich der magnetischen Induktion in irgend einem Punkte der Armaturoberfläche durch Rechnung bestimmen.

Die Dichte der magnetischen Belegung ist gleich dem magnetischen Moment

$$J_p = \frac{B_p}{4\pi}\left(\frac{1}{\mu_2} - \frac{1}{\mu_1}\right).$$

Die Armaturoberfläche A ist als Grenzfläche zwischen Eisen und Luft gleichfalls Sitz einer fingierten Belegung, deren Dichte

$$J_a = \frac{B_a}{4\pi}\left(\frac{1}{\mu_2} - \frac{1}{\mu_1}\right),$$

wenn B_a die Anzahl Kraftlinien bedeutet, welche durch die Flächeneinheit der Grenze A zwischen zwei Medien mit den Magnetisierungskonstanten μ_1 und μ_2 in letzteres Medium einströmen.

Hier wird $J_a = \pm \frac{B_a}{4\pi}$, weil die Permeabilität des Eisens sehr gross ist im Verhältnis zu derjenigen der Luft. (Siehe P. Drude: Physik des Aethers.)

Wollte man die Feldintensität im Luftraume ganz streng physikalisch bestimmen, so wäre folgende Aufgabe zu lösen: Man teilt die Oberfläche der Polschuhe und der Armatur in Streifchen (Flächenelemente) mit annähernd konstanter magnetischer Dichte J und sucht für jedes Streifchen die Normalkomponente der auf ihn wirkenden magnetischen Kräfte, herrührend von den magnetischen Flächenbelegungen aller Grenzflächen und von den in den Feldspulen fliessenden elektrischen Strömen. Die resultierende magnetische Kraftkomponente in einem Punkte ist nichts anderes als die Induktion in dem betreffenden Punkte, woraus folgt, dass

$$(I)\quad \begin{cases} H_1 + 4\pi J_1 = B_1 = a_{1,1} J_1 + a_{1,2} J_2 + \ldots + a_{1,n} J_n + H_{n,1} \\ H_2 + 4\pi J_2 = B_2 = a_{2,1} J_1 + a_{2,2} J_2 + \ldots + a_{2,n} J_n + H_{n,2} \\ \vdots \qquad\quad \vdots \qquad\quad \vdots \qquad\quad \vdots \qquad\qquad\qquad \vdots \\ H_n + 4\pi J_n = B_n = a_{n,1} J_1 + a_{n,2} J_2 + \ldots + a_{n,n} J_n + H_{n,n}, \end{cases}$$

wo $a_{x,y}$ die Konstante bedeutet, mit welcher man die magnetische Dichte J_y des y^{ten} Flächenelementes multiplizieren muss, um die Normalkomponente der magnetischen Kraft zu erhalten, welche auf dem x^{ten} Flächenelemente pro magnetische Masseneinheit ausgeübt wird. $H_{n,x}$ ist die Normalkomponente der elektromagnetischen Kräfte der Erregerspulen, welche auf die magnetische Masse $+1$ des x^{ten} Flächenelementes wirkt.

Vernachlässigen wir in dem Gleichungssystem (I) $H_1, H_2 \ldots H_n$ als verschwindend kleine Grössen gegenüber $4\pi J_1 \ldots 4\pi J_n$, so erhält man, indem man für jedes Flächenelement eine Gleichung und eine Unbekannte J_x hat, n lineare Gleichungen mit n Unbekannten, die also gefunden werden können, wenn die Konstanten $a_{x,y}$ und $H_{n,x}$ bekannt sind. Aus den Dichten J der Flächenelemente der Armaturoberfläche lässt sich demnach die Feldintensitätskurve konstruieren und unsere Aufgabe ist gelöst.

Die Lösung ist praktisch aber nicht so einfach wie theoretisch; denn die Berechnung der Konstanten $a_{x,y}$ und $H_{n,x}$ ist nicht so leicht, und die Zahl der Gleichungen wird eine grosse, wenn die Rechnung einigermassen genaue Resultate ergeben soll.

Um $a_{x,y}$ zu berechnen, kann man aus dem bekannten Massenwirkungsgesetz $\frac{m \cdot m_1}{r^2}$ folgenden Satz ableiten:

Die von der gleichmässig verteilten magnetischen Belegung J_y eines langen, schmalen und ebenen Flächenstreifchens df (von konstanter Breite und beliebiger Länge) erzeugte magnetische Kraft in irgend einem Punkte P hat eine Komponente K normal zu den parallelen Begrenzungslinien des betrachteten Streifchens

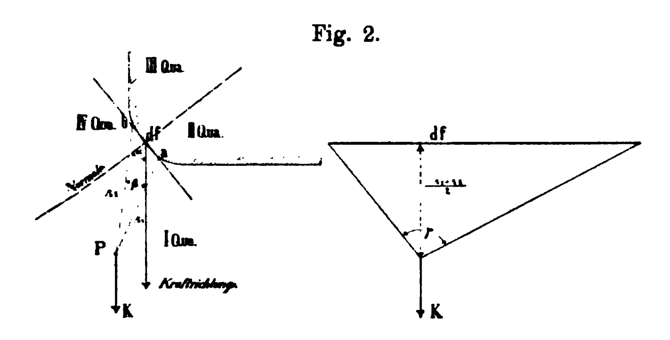
$$K = J_y \cdot a_{x,y} = J_y \cdot \left[\frac{2{,}3 \cdot 180}{\pi} \sin\alpha \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \beta \cos\alpha\right] \frac{\pi}{90} \cdot \frac{\gamma}{180},$$

wo α der spitze Winkel der Normalen des Streifchens mit der Richtung der Komponente K ist (siehe Fig. 2). β und γ sind die Oeffnungswinkel, unter welchen die Breite resp. die Länge des Streifchens df von P aus gesehen wird; β muss aber mit Vorzeichen gerechnet werden. Ferner ist es nicht gleichgültig, welcher von den Strahlen P_a und P_b mit r_2 bezeichnet wird. Am einfachsten ist folgendermassen zu verfahren: man teilt den ganzen Raum durch zwei Ebenen in vier Quadranten ein, wovon die eine mit dem Flächenstreifchen df zusammenfällt, während die andere normal zu den parallelen Begrenzungslinien desselben steht. Man bezeichnet denjenigen Quadranten als den

ersten, worin die positive Kraftrichtung fällt, und bestimmt demnach die anderen wie gewöhnlich, indem man sich vom ersten zum zweiten Quadranten entgegengesetzt dem Uhrzeiger bewegt. Nun ist β positiv im ersten und vierten, negativ im zweiten und dritten Quadranten, während $\log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$ positiv im ersten und zweiten, und negativ im dritten und vierten Quadranten einzuführen ist.

Ist $H_{n,x}$ die von einer Spule ausgeübte Kraftkomponente in irgend einer gegebenen Richtung und in einem gegebenen Punkte P, während f_P' einen Faktor bedeutet, der abhängig ist von der Lage des Punktes P

Fig. 2.



in Bezug auf die Feldspule und abhängig von der Kraftrichtung und den Dimensionen der Spule, so darf man immer schreiben

$$H_{n,x} = \frac{0{,}4\,\pi\,n\,i}{L} \,.\, f_P',$$

wo L gleich der Länge der Spule und n i gleich den Ampèrewindungen derselben.

Ferner ist, wie wir später sehen werden,

$$0{,}4\,\pi\,n\,i = C_1 \,.\, B_\delta \,.\, \delta,$$

wo

$$C_1 = \frac{\text{totale Ampèrewindungen}}{\text{Ampèrewindungen für den Luftzwischenraum}},$$

also

$$H_{n,x} = \frac{f_P' \,.\, C_1 \,.\, B_\delta \,.\, \delta}{L},$$

und indem

$$B_\delta = 4\,\pi\,J_\delta + H_\delta,$$

wo H_δ vernachlässigbar ist, wird

$$H_{n,x} = f_P' \,.\, C_1 \,.\, \frac{4\,\pi\,\delta}{L}\, J_\delta = f_P \,.\, J_\delta.$$

Da die magnetisierende Kraft aller Spulen nach derselben Formel berechnet werden kann, wo nur f_P für jede Spule einen anderen Wert hat, so darf man allgemein schreiben

$$H_{n,x} = f_P \cdot J_\delta,$$

wo $H_{n,x}$ die gesuchte Normalkomponente der totalen elektromagnetischen Kräfte aller Spulen bedeutet, welche in dem Gleichungssystem (I) einzuführen ist. — Da nun J_δ sicher mit irgend einer der Unbekannten J dieses Systemes zusammenfällt, erhalten wir in den Gleichungen (I) ein homogenes lineares System von n Gleichungen; d. h. die Form der Intensitätskurve des Feldes im Luftzwischenraum ist unabhängig von der Grösse J_δ, so lange $H_\delta : 4\pi J_\delta$ zu vernachlässigen ist und so lange, als C_1 konstant ist, was nur der Fall sein kann, wenn man auf dem unteren Teil der Magnetisierungskurve arbeitet. Diese zwei Bedingungen wollen wir hier voraussetzen; also kommt es für uns nur darauf an, die Form der Feldintensitätskurve bei einer beliebigen Felderregung zu bestimmen. Man hat nur $n - 1$ der n homogenen linearen Gleichungen nötig, um die Verhältnisse $\frac{J_1}{J_\delta}, \frac{J_2}{J_\delta} \ldots \frac{J_n}{J_\delta}$ zu finden, welche die Kurvenform ergibt, während die n^{te} Gleichung aus den anderen ableitbar sein muss und deswegen als Kontrolle dienen kann.

Um einen besseren Einblick in die Induktionsverteilungen im Luftzwischenraum zu erhalten, rechnen wir folgendes Beispiel durch:

Gegeben sei ein Polsystem für eine Armatur mit unendlich grossem Durchmesser; die Pole und die Armatur sind unendlich lang, während die Breite eines Polschuhes gleich 20 cm, die Höhe desselben gleich 4 cm und das Verhältnis Polbogen durch Polteilung zu 0,55 angenommen werden kann; ferner setzen wir den Luftzwischenraum δ gleich 0,8 cm und den Radius der Abrundungen des Polschuhes gleich 1,2 cm. Indem die Pole unendlich lang angenommen sind, geht jede Feldspule über in zwei unendlich lange, parallele Spulenseiten, die man der Einfachheit halber je für sich als eine sehr dünne Kupferschicht denken kann, über deren Querschnitt der Magnetisierungsstrom sich gleichmässig verteilt. Die Distanz dieser zwei Kupferschichten (gleich dem mittleren Abstand der zwei Spulenseiten) ist 16 cm (siehe ferner Fig. 3). Um nun f_P für einen beliebigen Punkt und eine beliebige Kraftrichtung zu bestimmen, erinnern wir an das Gesetz, nach welchem ein unendlich langes Stromelement auf die magnetische Masse + 1 im Abstande r eine elektromagnetische Kraft $\frac{2\,d\,i}{r}$ ausübt.

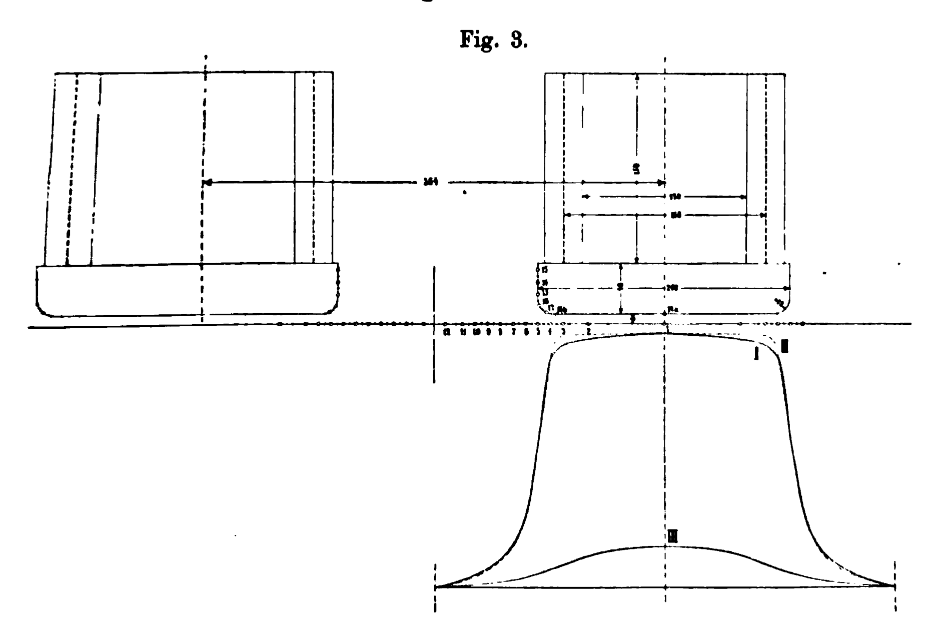
Hieraus folgt durch einfache Rechnungen:

Die über eine unendlich lange Spulenseite gleichmässig verteilten Ampèrewindungen $\left(\frac{n\,i}{L} \text{ pro Centimeter}\right)$ üben in irgend einem Punkte P eine magnetisierende Kraft aus, deren Komponente nach irgend einer Kraftrichtung normal zur Richtung der Spulenseite gleich

$$H_n = \frac{\pi\, n\, i}{90\, L}\left[\beta \sin\alpha - \frac{2{,}3 \,.\, 180}{\pi} \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \cos\alpha\right]$$

ist, wo α gleich dem Winkel zwischen der Normalen der Kupferschicht und der Kraftrichtung. Die Formel hat Aehnlichkeit mit der

Fig. 3.



auf S. 4 angegebenen Formel zur Berechnung von $a_{x,y}$. Hier muss man β und $\log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$ dieselben Vorzeichen geben, wie dort, in Uebereinstimmung mit den in die Figur eingeschriebenen Quadranten (Fig. 4).

Wir summieren nun alle die in einem Punkte wirkenden Normalkomponenten der magnetisierenden Kräfte der Feldspulen und erhalten

$$H_{n,x} = \frac{4\,\pi\, n\, i}{360\, L}\left\{\Sigma\,(\beta \sin\alpha) - 132\,\Sigma\left[\log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)\cos\alpha\right]\right\}$$

$$= J_\delta\,\frac{C_1\,\pi\,\delta}{90\, L}\left\{\Sigma\,(\beta \sin\alpha) - 132\,\Sigma\left[\log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)\cos\alpha\right]\right\}.$$

Kehren wir nun zu unserer Aufgabe zurück und zerlegen die Oberfläche der Armatur und Polschuhe in schmale, unendlich lange Flächenstreifchen, so erhalten wir mehrere Streifchen, die wegen der Symmetrie des Gebildes hinsichtlich der Grösse und Intensität J einander gleich sind. Die Fig. 3 zeigt eine Einteilung in 18 verschiedene Flächenelemente. Benützen wir die Formeln

$$a_{x,y} = \frac{\pi}{90} \left\{ \Sigma (\beta \cos \alpha) + \Sigma \left[132 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \sin \alpha \right] \right\}$$

und

$$H_{n,x} = J_\delta \frac{\pi}{90} \cdot 0{,}08 \left\{ \Sigma (\beta' \sin \alpha') - \Sigma \left[132 \log \left(\frac{r_2'}{r_1'} \right) \cos \alpha' \right] \right\},$$

indem $C_1 = 1{,}5$ und $L = 15$ gesetzt worden ist, so bekommen wir 18 Gleichungen. Wir setzen $J_\delta = J_{18} = 1$ und erhalten also 18 lineare Gleichungen zur Bestimmung von $J_1, J_2 \ldots J_{17}$, während aus der 18. Gleichung J_{18} zur Kontrolle berechnet werden kann. Sie muss für J_{18} den Wert 1 ergeben. Wir multiplizieren alle Gleichungen auf beiden Seiten des Gleichheitszeichens mit $\frac{90}{\pi}$ und erinnern daran, dass die von einem ebenen Flächenelemente mit der Dichte J auf einem in demselben liegenden Punkte wirkende Normalkomponente gleich $2\pi J$ ist, d. h. $a_{y,y} = 2\pi$, und erhalten somit für das 5. und 16. Flächenelement die folgenden Gleichungen, die als Beispiele dienen können.

$$180\, J_5 = 13{,}3\, J_{13} + 17{,}6\, J_{14} + 25{,}4\, J_{15} + 27\, J_{16} + 28{,}2\, J_{17} + 35{,}1\, J_{18} + 0{,}98\, J_\delta,$$

$$180\, J_{16} = -43\, J_1 - 39{,}3\, J_2 - 8{,}6\, J_3 + 10\, J_4 + 20{,}3\, J_5 + 22{,}6\, J_6 + 20{,}5\, J_7 + 12{,}3\, J_8 + 8{,}8\, J_9 + 5{,}8\, J_{10} + 4{,}1\, J_{11} + 2{,}7\, J_{12} + 11{,}8\, J_{13} + 16{,}3\, J_{14} + 21{,}0\, J_{15} + 7{,}0\, J_{16} + 13{,}5\, J_{17} + 142{,}3\, J_{18} + 3{,}18\, J_\delta.$$

Die Lösung der 17 ersten Gleichungen lautet:

$J_1 = 0{,}978,\quad J_5 = 0{,}55,\quad J_9 = 0{,}0735,\quad J_{13} = 0{,}138,$
$J_2 = 0{,}955,\quad J_6 = 0{,}291,\quad J_{10} = 0{,}050,\quad J_{14} = 0{,}154,$
$J_3 = 0{,}934,\quad J_7 = 0{,}161,\quad J_{11} = 0{,}035,\quad J_{15} = 0{,}288,$
$J_4 = 0{,}883,\quad J_8 = 0{,}107,\quad J_{12} = 0{,}011,\quad J_{16} = 0{,}675,$
$J_{17} = 1{,}15.$

Das Flächenelement 18 ist sehr gross, weshalb wir für zwei verschiedene Punkte desselben, einmal für die Mitte 18a und das andere Mal für einen Punkt der äusseren Kante 18b die Gleichung 18 aufgestellt haben, um nicht allein die Richtigkeit der Rechnung zu kon-

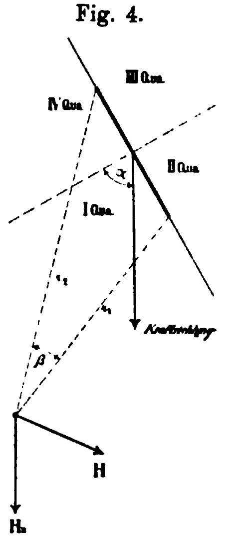
trollieren, sondern um auch die Zulässigkeit der Annahme einer konstanten Dichte dieses Flächenelementes zu prüfen; man findet

$$\left.\begin{array}{lll} & \text{für die Mitte} & J_{18a} = 0{,}969 \\ \text{und} & & \\ & \text{„ „ Aussenkante} & J_{18b} = 0{,}967 \end{array}\right\}\text{ statt 1.}$$

Indem der Fehler in J_{18} ca. 3 % ausmacht, darf man aus den Eigenschaften des Gleichungssystemes schliessen, dass J_1, $J_2 \ldots J_{12}$ nicht mehr als 1,5 % fehlerhaft sind.

In Fig. 3 stellt die voll ausgezogene Kurve I die aus den 17 Gleichungen berechnete Feldintensitätskurve dar. Die Kurve III gibt uns die elektromagnetische Kraftkurve (die $H_{s,x}$-Kurve längs der Armaturoberfläche) in dem 10fachen Massstabe; diese letzte hat eine etwas mehr abgerundete Form als die erste, obgleich man deutlich sehen kann, dass der obere Teil der Kurve I wegen des Einflusses der elektromagnetischen Kräfte mehr abgerundet worden ist, als es der Fall wäre, wenn man diese Kräfte vernachlässigt hätte.

Fig. 4.



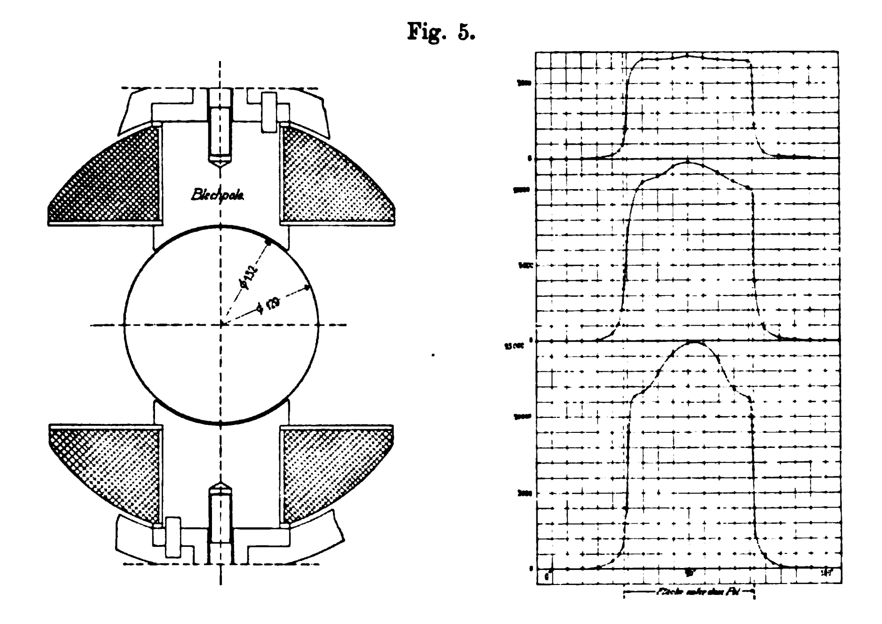
Wir haben in diesem Beispiel angenommen, dass die Pole und die Armatur unendlich lang sind; da dieser Fall nie vorkommt, ist es interessant, zu untersuchen, wie sich die Feldverteilung ändert, wenn man die Polschuhe und die Armatur von endlicher Länge annimmt, z. B. 40 cm lang, wodurch die Pollänge doppelt so gross wird als der Polbogen.

Betrachtet man ein Streifchen der Armaturoberfläche parallel zur Achse, so ist die Induktion in der Mitte dieses Streifchens ein Maximum und nimmt dann ganz langsam nach den Enden des Polschuhes hin ab. In Bezug auf die in einem Stab induzierte E.M.K. ist der Mittelwert der Induktion dieses Streifchens von Bedeutung und man kann durch Integration nachweisen, dass die Form der Kurve, welche die mittlere Induktion eines Streifchens parallel der Armaturachse als Funktion des Armaturumfanges darstellt, mit grosser Annäherung berechnet werden kann durch alleinige Berücksichtigung der magnetischen Flächenbelegungen konstanter Dichte, die auf Flächenstreifchen der Polschuhe parallel der Achse gedacht werden, und zwar ist die Kurve dieser mittleren Induktion fast genau ähnlich der Kurve

der maximalen Induktion im radialen Mittelschnitte der Armaturoberfläche.

Rechnerisch ist es schwierig, den Einfluss der $H_{n,x}$ festzustellen. Untersucht man aber die Feldintensitätskurve eines Wechselstromgenerators für verschiedene Erregungen experimentell, so wird man finden, dass bei Maschinen, wo der Polbogen grösser ist als die Weite der Magnetspule, bei höheren Erregungen die Feldintensitätskurve ihre Form ändert, indem die Induktion sich in der Mitte viel stärker erhöht als unter den Ecken der Polschuhe, obgleich der Luftzwischenraum δ überall gleich ist. Fig. 5 gibt z. B. die Feldverteilungskurven einer

Fig. 5.



Eisenuntersuchungsmaschine (zur Bestimmung drehender Hysteresis) bei drei verschiedenen Erregungen, die sich wie 1 : 2 : 3 verhalten; die Kurven wurden anlässlich einer Diplomarbeit von Herrn L. Bloch zuerst aufgenommen.

Indem die Grösse der Erhöhung der Polkurve mit der Erregung zunimmt, und da die Breite des erhöhten Teiles mit der Weite der Erregerspule übereinstimmt, so liegt nur die Möglichkeit vor, dass diese Deformation der gleichmässigen Feldverteilung im Luftzwischenraume seine Ursache in der Ungleichförmigkeit der elektromagnetischen Kraft der Feldspule unter dem Polschuhe hat; denn bei mehreren Maschinen mit verschie-

denen Polschuhmaterialien und Polschuhkonstruktionen tritt dasselbe Phänomen immer gleich auf; und zwar hat der obere Teil der Polkurve Aehnlichkeit mit dem mittleren Teil der elektromagnetischen Kraftkurve Fig. 3, Kurve III. Diese Annahme wird auch dadurch bestätigt, dass der Buckel erst auftritt bei einer bestimmten Grösse des Verhältnisses

$$\frac{H_{n,x}}{J_\delta} = f_P = f_P' \, . \, C_1 \, . \, \frac{4 \pi \delta}{L} = C_1 \, . \, \text{konstant},$$

welches mit C_1 wächst, da die anderen Grössen konstant sind.

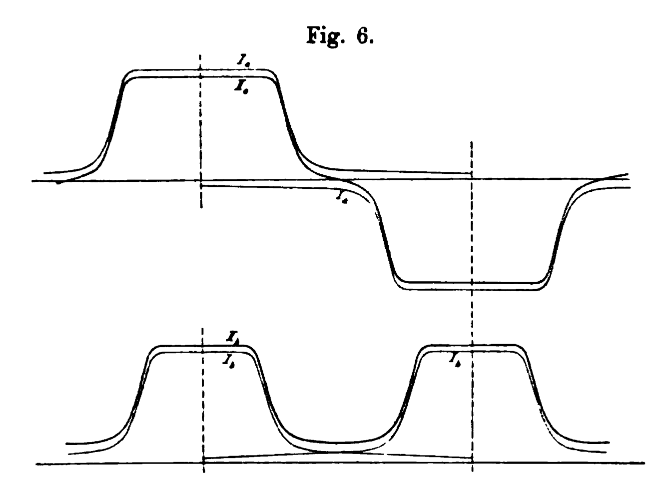
Im folgenden werden wir uns nur mit der Berechnung solcher Feldkurven beschäftigen, die bei einer so niedrigen Erregung liegen, dass die Induktion unter dem Polschuh fast konstant wird; denn es ist fast unmöglich, Kurven mit einem Buckel richtig zu berechnen, und es hat auch nicht viel Wert, weil diese Erhöhung der Induktion von zu vielen Umständen (Form und Material des Polschuhes, Dimensionen der Magnetspulen und Stärke der Erregung) beeinflusst wird, und weil man die für eine Maschine erhaltenen Resultate nicht direkt auf eine andere übertragen kann. — Die Feldkurven mit gleichmässiger Feldverteilung unter dem Polschuh kann man einfach berechnen, indem man die elektromagnetischen Kräfte $H_{n,x}$ der Feldspulen durch eine Erhöhung der Flächenbelegungen des Polschuhes ersetzt, wie es auch am Anfang dieses Abschnittes als möglich angegeben wurde. Stellt man die 12 ersten Gleichungen des Systemes (I) auf, so können diese zur Berechnung von $J_1, J_2 \ldots J_{12}$ dienen, wenn $J_{13} \ldots J_{18}$ und $H_{n,1} \ldots H_{n,12}$ bekannt sind; $H_{n,1} = f_I J_\delta$, $H_{n,2} = f_{II} J_\delta \ldots$ darf man aber durch eine prozentuale Erhöhung von $J_{13} \ldots J_{18}$ ersetzen; denn das Verhältnis $\frac{f_I}{J_1} J_\delta$, $\frac{f_{II}}{J_2} J_\delta \ldots$ schwankt zwischen 1 und 3 %, im Mittel 2 %. Um den Einfluss dieser Vernachlässigung und den Einfluss einer endlichen Polschuhlänge zu zeigen, ist für dasselbe Beispiel wie früher (Polschuhlänge gleich 40 cm) die Feldintensitätskurve im Mittelschnitt der Armatur als Funktion des Umfanges berechnet, indem die 12 Gleichungen $J_1 \ldots J_{12}$ aufgestellt sind und darin sind die früher gefundenen Werte von $J_{13} \ldots J_{18}$ mit 1,02 multipliziert eingesetzt. Die in dieser Weise erhaltene Feldintensitätskurve ist in Fig. 3 Kurve II dargestellt, und wie man sieht, weicht sie nicht viel von Kurve I ab.

II. Kapitel.

Praktische Vorausbestimmung der Feldintensitätskurve.

Wir haben gesehen, dass man, um die Feldkurve zu bestimmen, nur nötig hat, sich gewisse magnetische Flächenbelegungen an der Polschuhoberfläche angebracht zu denken. Daraus folgt, da alle Gleichungen zur Bestimmung von J_1, J_2 ... J_{12} linearer Natur sind, dass es gestattet ist, die magnetischen Einflüsse der einzelnen Polschuhe zu superponieren, was dadurch geschieht, dass man zuerst die Feldverteilungskurve (Fig. 6, Ia und Ib) um einen Pol herum berechnet und aufzeichnet, um hernach diese Kurven unter Berücksichtigung der

Fig. 6.



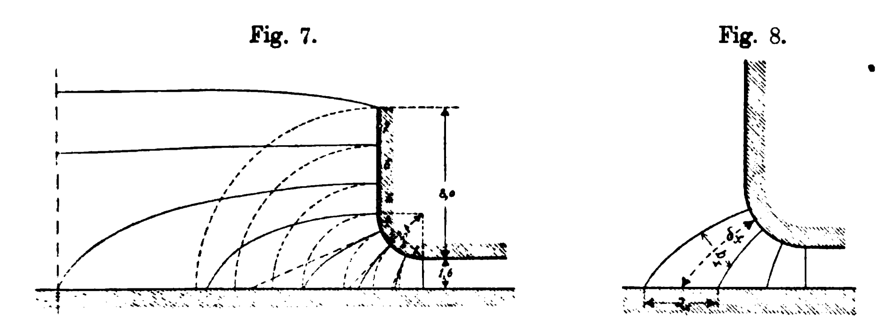
Vorzeichen der magnetischen Kräfte und der richtigen Lage der Pole übereinander zu lagern. In Fig. 6a und 6b ist diese Superposition ausgeführt, einmal für eine Wechselpolmaschine und das andere Mal für eine Gleichpolmaschine. Für die erste erhält man ein Wechselfeld (Kurve IIa), während im letzten Falle ein wellenförmiges Feld (Kurve IIb) entsteht. Die Aufgabe ist somit reduziert auf die Bestimmung der Feldverteilungskurve um einen Pol herum. Um diese zu lösen, kann man nach zwei Methoden verfahren, nämlich eine einfachere, schnellere und genügend genaue für die Praxis, und eine genauere die wir später benützen wollen, um für die am häufigsten vorkommenden Polanordnungen einige Koëffizienten zu berechnen.

Wie bekannt, stellt die Kraftflussverteilung eines magnetischen Feldes sich immer so ein, dass die magnetische Energie desselben ein

Maximum wird; zeichnet man deswegen mehrere Kraftlinienbilder für dasselbe Feld auf, so liegt dasjenige Bild, welches dem kleinsten magnetischen Widerstand oder dem grössten Kraftfluss entspricht, der Wirklichkeit am nächsten. Bei der Aufzeichnung der Bilder muss man darauf achten, dass die Kraftlinien die Eisenoberflächen unter beinahe rechten Winkeln durchsetzen.

Um einen Einblick in die Kraftflussverteilung im Luftzwischenraume einer Dynamomaschine zu bekommen, zeichnen wir das Bild der Verteilung auf, das sich aus der früher gelösten Aufgabe ergibt und in Fig. 7 durch die voll ausgezogenen Linien dargestellt ist. In derselben Figur sind zum Vergleich zwei andere Verteilungen aufgezeichnet, nämlich eine, wo die Kraftlinien als Gerade, welche die Polschuhoberfläche unter 90° schneiden, angenommen sind, und eine

Fig. 7. Fig. 8.



zweite, wo die Kraftlinien nach Kreisbogen verlaufen, die sowohl den Polschuh wie die Armaturoberfläche unter 90° schneiden.

Die erste einfachere Methode besteht nun darin, dass man ein Paar Kraftlinienbilder nach dem oben berechneten Vorbild für die betreffende Polanordnung aufzeichnet und damit den betrachteten Raum in Kraftröhren zerlegt, deren Leitfähigkeiten man berechnet. Das Bild mit der grössten magnetischen Leitfähigkeit nimmt man als richtig an und setzt unter der Annahme einer konstanten magnetischen Potentialdifferenz zwischen Polschuh und Armaturoberfläche den Kraftfluss jedes Rohres proportional der Leitfähigkeit desselben. Die Induktion B in einem Punkte x der Armaturoberfläche wird dann proportional der Leitfähigkeit des Rohres, worin der Punkt liegt, geteilt durch die Schnittfläche des Rohres mit der Armaturoberfläche.

Hat man das Kraftlinienbild gefunden, das man als richtig ansehen will, so kann man, wie Fig. 8 zeigt, mit b_x die mittlere Weite und mit δ_x die mittlere Länge des Kraftrohres bezeichnen, es wird

dann die Leitfähigkeit des Rohres mit grosser Annäherung proportional $\frac{b_x}{\delta_x}$ und damit die Feldstärke im Punkte x proportional $\frac{b_x}{a_x \cdot \delta_x}$.

Nach der Aufzeichnung der Feldverteilung um einen Pol herum findet man durch Superposition dieser Kurven, wie Fig. 6 zeigt, das wirklich auftretende Feld.

Die zweite Methode, die genauere Resultate ergibt, besteht darin, dass man nach der Methode I die Feldstärken oder Dichten J auf den Polschuhen bestimmt und demnach die magnetischen Kräfte der Armaturoberfläche nach den angegebenen Gleichungen berechnet. Dieses Verfahren ist nicht so willkürlich, wie das vorhergehende; denn bestimmt man z. B. die Dichten des Polschuhes in Fig. 7 nach den drei verschiedenen Kraftlinienbildern, so findet man folgendes Resultat, wenn man die Seite und die Abrundung des Polschuhes in sieben Teile zerlegt und die konstante Dichte unter dem Polschuhe $J_{18} = 1$ setzt:

Für Streifchen	1	2	3	4	5	6	7
Wenn die Kraftlinien nach Geraden verlaufen J = . . .	1,28	0,95	0,66				
Wenn die Kraftlinien nach Kreisbogen verlaufen J = .	1,18	0,98	0,76	0,59	0,23	0,153	0,118
Nach der Berechnung J = .	1,15 (1–2)		0,675 (3–4)		0,30	0,17	0,15

Hieraus sieht man, dass die Bestimmung von $J_{13} \ldots J_{18}$ eine ziemlich genaue werden kann, wenn man bedenkt, dass selbst bei so grossen Unterschieden in den Kraftlinienbildern, wie bei diesen drei, nur eine so kleine Abweichung in den berechneten J auftritt.

III. Kapitel.

Der Formfaktor und der Füllungsfaktor der Feldintensitätskurve.

Die in einem geschlossenen Stromkreise induzierte momentane E.M.K. ist

$$e_x = -\frac{\delta (Z_x w)}{\delta t},$$

wo $(Z_x w)$ gleich der Anzahl der Kraftflussverkettungen des Strom-

kreises in irgend einem Momente. Durchsetzt der Kraftfluss Z_x alle w-Windungen des Stromkreises, so kann man schreiben

$$e_x = - w \frac{\delta Z_x}{\delta t}$$

und der **Mittelwert** der E.M.K., die von einem periodisch sich ändernden Kraftfluss mit dem Maximalwert Z_{max} induziert wird, ist gleich

$$E_{mitt} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \left(- w \frac{\delta Z_x}{\delta t}\right) d t = \frac{2 w}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} (- d Z_x),$$

wo $T = \frac{1}{c}$ = Zeit einer vollständigen Periode; ferner müssen wir die Zeit von dem Momente an rechnen, wo Z sein absolutes Maximum besitzt, damit für $t = 0 \; \frac{\delta Z_x}{\delta t} = 0$ wird.

Es wird

$$E_{mitt} = 4 c w Z_{max} \text{ in absoluten Einheiten}$$

oder

$$E_{mitt} = 4 c w Z_{max} 10^{-8} \text{ Volt.}$$

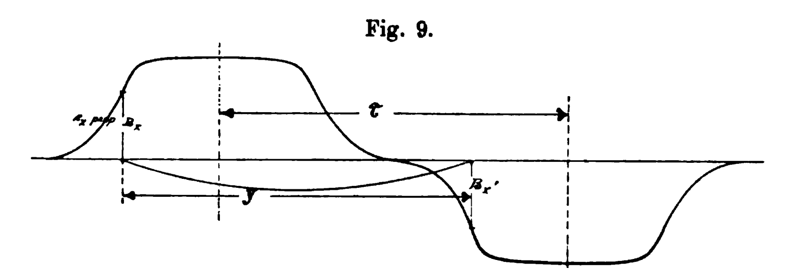
Das Verhältnis zwischen dem Effektivwert E und dem Mittelwert E_{mitt} der E.M.K. wird bekanntlich nach Fleming „Formfaktor“ genannt. Hier, wo wir uns zuerst mit einer Einlochwicklung beschäftigen, deren Spulenweite $y = \tau$ ist, bezeichnen wir diesen Faktor mit f_B, wonach folgt

$$E = f_B \, . \, E_{mitt} = 4 f_B c w Z_{max} 10^{-8}.$$

Nach dieser Formel kann man also die in der Armatur einer Wechselstrommaschine induzierte E.M.K. berechnen, wenn alle Windungen derselben gleichzeitig von dem maximalen Kraftfluss durchsetzt werden. Dies ist aber nicht immer der Fall, denn hat man z. B. eine verteilte Wicklung oder eine Mehrlochwicklung, so ist entweder Z_{max} für die einzelnen Windungen verschieden oder tritt nicht für alle Windungen in demselben Momente auf. Eine Wicklung der ersten Art ist aber immer äquivalent einer solchen der zweiten Art und kann also durch eine solche ersetzt werden, wie später gezeigt werden soll. Die in den einzelnen Windungen einer derartigen Wicklung induzierten E.M.Ke. haben denselben Effektivwert, aber sie sind nicht alle in Phase miteinander und ergeben zusammengesetzt eine resultierende effektive E.M.K., kleiner als die algebraische Summe der einzelnen Effektivwerte; das Verhältnis dieser zwei Grössen, die geometrische

Summe der Effektivwerte durch die algebraische Summe derselben geteilt, ist kleiner als 1 und wird mit f_w bezeichnet; diese Grösse ist in erster Linie abhängig von der Art der Wicklung, in zweiter Linie ganz wenig abhängig von der Feldintensitätskurve und wird deswegen

Fig. 9.

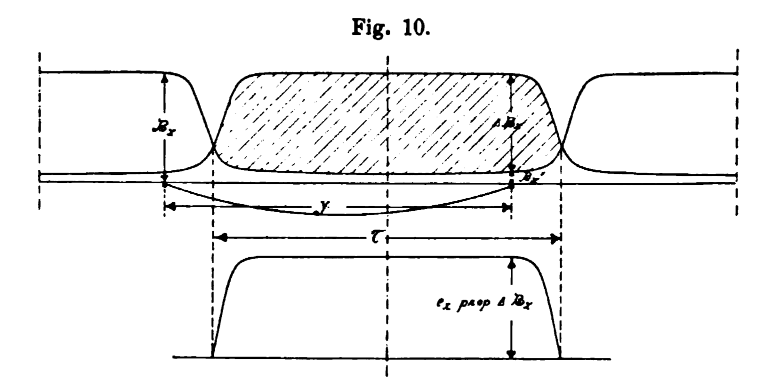


als Wicklungsfaktor bezeichnet. Aus dem Grunde bekommt man für alle Wechselstromwicklungen

$$E = 4\, f_B\, f_w\, c\, w\, Z_{max}\, 10^{-8} = 4\, k\, c\, w\, Z_{max}\, 10^{-8}.$$

Um f_B zu bestimmen, betrachten wir eine Wicklung oder einen Teil einer Wicklung, für welche $f_w = 1$. Einen solchen Teil bilden

Fig. 10.



die Spulen einer Einlochwicklung; um aber den Faktor f_B ganz unabhängig von der Wicklung zu machen und den ganzen Einfluss der Wicklung auf E in den Faktor f_w hinein zu verlegen, wählen wir für unsere Betrachtung eine Einlochwicklung, deren Abstand ihrer Spulenseiten y genau gleich der Polteilung τ (halber Abstand gleichnamiger Pole) ist. Zuerst bestimmen wir f_B für eine Wechselpoltype. Wir haben hier aus Fig. 10

$$e_x = -w\,\frac{\delta Z_x}{\delta t} = w\,(B_x - B_x')\,.\,l\,.\,v,$$

wo l die Länge eines Polschuhes, v die Geschwindigkeit eines Polschuhes relativ zur Armatur bedeutet. $(B_x - B_x') \cdot l \cdot v$ ist gleich der Variation des Kraftflusses Z_x während eines Zeitelementes d t.

Hier ist

$$- B_x' = B_x,$$

also

$$e_x = 2\, w\, l\, v\, B_x = \text{Konstante mal } B_x,$$

d. h. die Form der E.M.K.-Kurve ist die nämliche wie die der Feldintensitätskurve und

$$f_B = \frac{\sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} e_x^2\, d\,x}}{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} e_x\, d\,x} = \frac{\sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} B_x^2\, d\,x}}{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} B_x\, d\,x},$$

wonach f_B nichts anderes ist als der Formfaktor der Feldintensitätskurve des Wechselfeldes.

Bei den Gleichpoltypen liegt die Sache etwas anders. Hier ist $B_x - B_x'$ nicht gleich $2 B_x$, sondern gleich der Ordinate ΔB_x in den schraffierten Flächen (Fig. 10), also

$$e_x = w\, l\, v\, (\Delta B_x)$$

und

$$f_B = \frac{\sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} e_x^2\, d\,x}}{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} e_x\, d\,x} = \frac{\sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} (\Delta B_x)^2\, d\,x}}{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} (\Delta B_x)\, d\,x}.$$

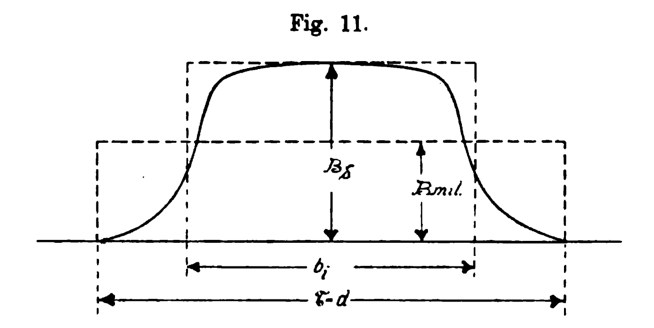
Den Faktor f_B einer Gleichpolmaschine findet man also als Formfaktor der ΔB_x-Kurve, die man aus der Feldintensitätskurve konstruieren kann, indem man diese gegen sich selbst um die Polteilung τ verschiebt und die Differenzen der Ordinaten dieser Kurven als Ordinaten der ΔB_x-Kurve aufträgt (Fig. 10).

Wir gehen jetzt zur Bestimmung von Z_{max} über unter der Voraussetzung, dass die maximale Induktion B_δ unter dem Polschuhe bekannt ist. Betrachten wir das Feld einer Wechselpoltype, so kann man, wie aus Fig. 11 ersichtlich ist, für Z_{max} setzen

$$Z_{max} = B_{mitt} \cdot l \cdot \tau = B_\delta \cdot l \cdot b_i;$$

denn bewegt man eine Spule, die eine Spulenweite $y = \tau$ hat und den maximalen Kraftfluss Z_{max} umschlingt, um eine halbe Periode, d. h. auf einem Wege $= \tau$, so ändert der die Spule durchsetzende Kraftfluss seine Richtung. Die totale Variation wird $= 2 Z_{max}$ und die Hälfte

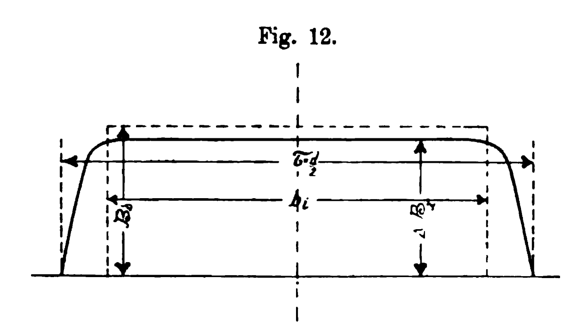
Fig. 11.



derselben ist gleich der von einem Pol in die Armatur eintretende Kraftfluss $B_{mitt} . \tau . l$.

Das Verhältnis $\frac{b_i}{\tau}$ ist unter Voraussetzung einer gegebenen maximalen Luftinduktion B_δ ein Mass für den maximalen Kraftfluss, der

Fig. 12.



von einem Pol in eine Armatur eintreten kann; dieses Verhältnis kann man „Füllungsfaktor“ heissen und mit α_i bezeichnen.

Also wird

$$Z_{max} = \alpha_i . \tau . l . B_\delta.$$

Hat man es mit einer Gleichpoltype zu thun, so sieht man aus Fig. 10, dass die Kraftflussvariation einer Spule, welche die Weite $y = \tau$ hat und die den maximalen Kraftfluss umschlingt, bei Bewegung derselben um eine halbe Periode gleich $\Delta B_{mitt} . l . \tau$ gesetzt werden kann.

Hieraus folgt, da Z_{max} gleich der Hälfte der Kraftflussvariation einer **halben** Periode

$$Z_{max} = \frac{1}{2} \Delta B_{mitt} \cdot l \cdot \tau$$

$$= \frac{1}{2} B_\delta \cdot l \cdot b_i.$$

Bezeichnet man nun wie oben bei der Wechselpoltype den Abstand zwischen den Mitten zweier Polhörner mit 2τ und das Verhältnis $\frac{b_i}{2\tau}$ mit α_i, so wird auch hier

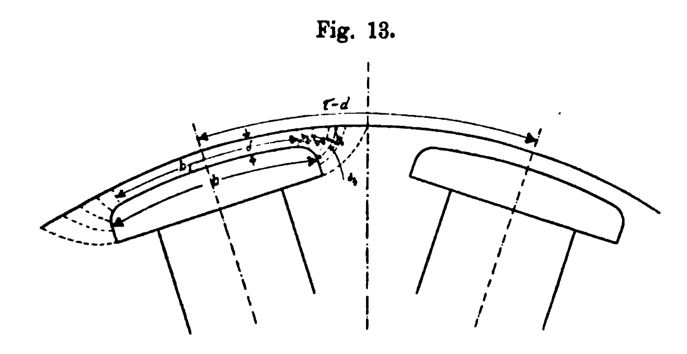
$$Z_{max} = \alpha_i \cdot \tau \cdot l \cdot B_\delta,$$

welche Formel also allgemein gültig ist für alle Wechselstromgeneratoren; setzt man diesen Ausdruck für Z_{max} in die Gleichung der effektiven E.M.K. E ein, so folgt allgemein

$$E = 4 \cdot f_B \cdot f_w \cdot c \cdot w \cdot B_\delta \cdot \tau \cdot l \cdot \alpha_i \, 10^{-8}.$$

Es kann oft wünschenswert sein, α_i zu bestimmen, ohne die Feldintensitätskurve zu konstruieren, und dies ist in einfacher Weise mit

Fig. 13.



grosser Annäherung möglich, indem man, wie früher angegeben, das wahrscheinlichste Kraftlinienbild aufzeichnet und folgende einfache Rechnung durchführt.

Ist eine Wechselpoltype gegeben, so hat man ungefähr folgendes Bild (Fig. 13).

$$Z_{max} = B_{mitt} \cdot l \cdot \tau = B_\delta \cdot l \cdot \tau \cdot \alpha_i$$

$$= B_\delta \cdot l \cdot \left(b_1 + \frac{2\, b_2\, \delta}{\delta_2} + \frac{2\, b_3\, \delta}{\delta_3} + \ldots\right).$$

Also

$$\alpha_i = \frac{1}{\tau} \left[b_1 + 2\,\delta \left(\frac{b_2}{\delta_2} + \frac{b_3}{\delta_3} + \ldots\right)\right].$$

Will man aber für diese Type den Wert α_i nicht graphisch ermitteln, so kann man ihn durch folgende Annäherung berechnen:

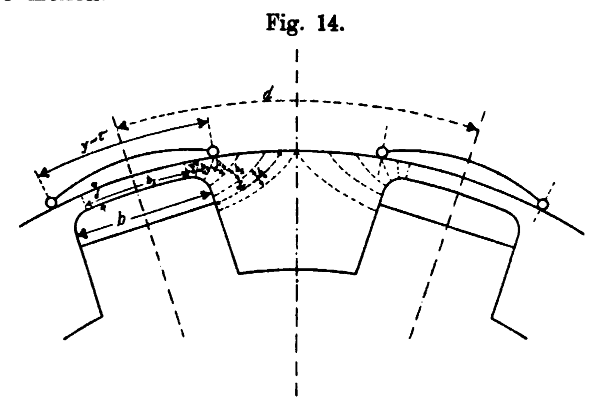
$$\alpha_i = \frac{1}{\tau}(b + \delta)$$

für abgerundete Polschuhecken und

$$\alpha_i = \frac{1}{\tau}(b + 2{,}5\,\delta)$$

für scharfe Ecken.

Fig. 14.



Betrachten wir aber eine Gleichpoltype, so kann man das Bild Fig. 14 aufzeichnen und es wird

$$\alpha_i = \frac{1}{2\tau}\left[b_1 + 2\delta\left(\frac{b_2}{\delta_2} + \frac{b_3}{\delta_3} - \frac{b_4}{\delta_4} - \frac{b_5}{\delta_5} - \frac{b_6}{\delta_6}\right)\right].$$

IV. Kapitel.

Die Wicklungen und ihr Wicklungsfaktor f_w.

Wie früher gezeigt, ist die in einer Windung induzierte E.M.K.

$$e_x = -w\left(\frac{\delta Z_x}{\delta t}\right) = w \,.\, l \,.\, v\,(B_x - B_x'),$$

wo B_x und B_x' die Induktionen in dem betrachteten Momente an den Stellen sind, wo die resp. Spulenseiten der Windungen sich befinden.

Ist

$$B_x = - B_x' \text{ (Wechselpoltype),}$$

so wird

$$e_x = 2 w\, l\, v\, B_x = s\, l\, v\, B_x,$$
$$E_{mitt} = s\, l\, v\, B_{mitt} = s\, l\, v\, \alpha_i\, .\, B_\delta,$$
$$v = 2 c \tau,$$

also

$$E_{mitt} = 2 s\, c\, B_\delta\, l\, .\, \tau\, .\, \alpha_i\, 10^{-8} \text{ Volt}$$

und daraus für mehrere Windungen die effektive E.M.K.

$$E = 2 f_B\, f_w\, s\, c\, B_\delta\, l\, \tau\, \alpha_i\, 10^{-8},$$

welche Formel bei Stabwicklungen bequemer ist als die frühere Formel mit w, und besonders, wenn die Anzahl der Stäbe ungerade ist, was ja bei Wicklungen nach einem Gleichstromschema vorkommen kann. In jedem Stabe wird eine E.M.K. induziert, deren Kurvenform mit derjenigen des Feldes übereinstimmt, aber alle diese E.M.Ke. sind bei Mehrlochwicklungen und verteilten Wicklungen nicht in Phase miteinander, weshalb man die resultierende effektive E.M.K. E besonders ausrechnen muss; diese wird kleiner sein als die E.M.K., die man durch Multiplikation der in einem Stabe induzierten E.M.K. (e) mit der Zahl der in Serie geschalteten Stäbe s pro Phase erhält.

Das Verhältnis

$$\frac{E}{s\, e} = f_w < 1$$

haben wir als Wicklungsfaktor definiert und die Berechnung desselben werden wir jetzt zeigen. — Man kann nach zwei Methoden verfahren, einer geometrischen und einer rechnerischen. Die erste ist die einfachere, wenn man nur E oder den Faktor f_w für eine Wicklung allein berechnen will, während die zweite schneller zum Ziele führt, wenn man gleichzeitig die Wicklungsfaktoren aller Wicklungen für dieselbe Feldintensitätskurve berechnen will.

Nach der ersten Methode superponiert man einfach alle E.M.K.-Kurven der verschiedenen Stäbe einer Wicklung, wodurch sich die E.M.K.-Kurve einer Phase ergibt, und berechnet für diese die resultierende effektive E.M.K. E und die in einem Stabe induzierte E.M.K. (e). Es ist dann

$$f_w = \frac{E}{s\, e}.$$

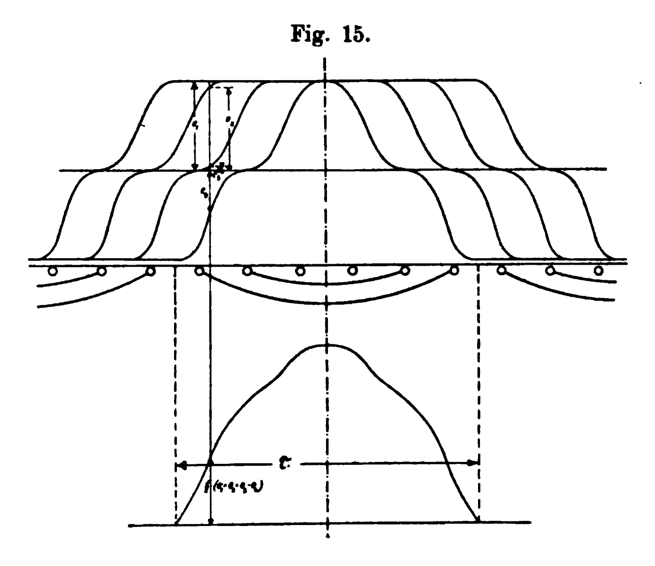
Als Beispiel kann eine Vierloch-Einphasenwicklung einer Wechselpolmaschine dienen, deren Bleche sechs Löcher pro Pol besitzen (Fig. 15).

Jede Spulenseite ist in vier Löchern untergebracht und alle sind identisch in Bezug auf Drahtzahl und die räumliche Lage relativ zu den Polen. Man braucht also hier nur vier Feldintensitätskurven, die um eine Lochdistanz gegeneinander verschoben sind, zu superponieren und den Effektivwert der resultierenden Kurve durch 4mal dem Effektivwert der Feldintensitätskurve zu dividieren, um

$$f_w = \frac{E}{4\,e}$$

zu bekommen. Den Effektivwert einer Kurve berechnet man entweder durch Aufzeichnung der Quadrate der Ordinaten dieser Kurve und

Fig. 15.



Planimetrieren der erhaltenen Fläche oder nach der Methode von Fleming, indem man die Abscisse einer halben Periode der e_x-Kurve in 12 Teile teilt und die in den Teilpunkten abgegriffenen Ordinaten auf 12 Radien-Vektoren, welche 180° in 12 gleiche Teile zerlegt, abträgt. Die so erhaltene Polarkurve der E.M.K., die für eine sinusförmige E.M.K. ein Kreis ist, umschliesst eine Fläche gleich

$$\int_0^{\pi} \frac{1}{2}\, e_x^2\, d\,\frac{2\pi t}{T} = \frac{1}{2}\int_0^{\frac{T}{2}} \frac{2\pi}{T}\, e_x^2\, d\,t$$

$$= \frac{\pi}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} e_x^2\, d\,t.$$

Setzt man diese Fläche gleich $R^2\pi$, so wird

$$R^2\pi = \frac{\pi}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} e_x{}^2\,dt$$

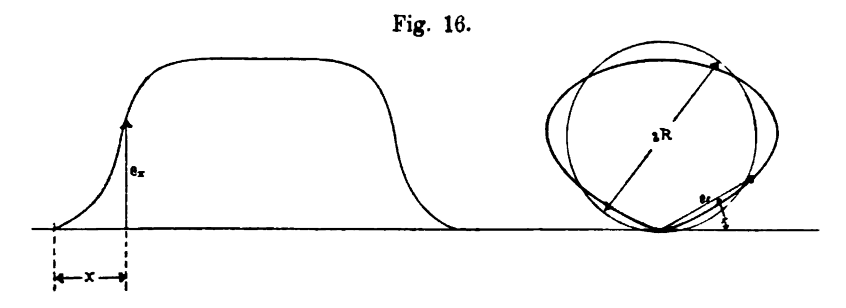
und

$$\sqrt{2}\,R = \sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} e_x{}^2\,dt} = E_{eff}$$

Zeichnet man deswegen einen Kreis mit demselben Flächeninhalt wie die Polarkurve, so ist der Halbmesser mal $\sqrt{2}$ gleich dem Effektivwert der E.M.K.-Kurve (Fig. 16).

Betrachtet man eine Einlochwicklung, deren Spulenweite y kleiner oder grösser als τ ist, so muss man, um die in einer solchen Spule induzierte E.M.K. zu bestimmen, die in beiden Spulenseiten induzierten

Fig. 16.

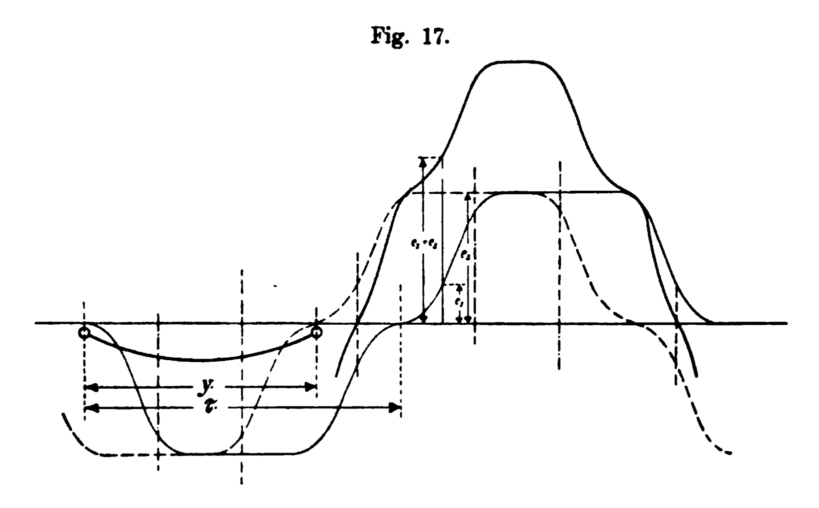


E.M.Ke. superponieren, was am einfachsten geschieht, indem man von zwei Feldintensitätskurven, die dieselbe Kurvenform haben wie die in jedem Stabe induzierte E.M.K., die eine umklappt, um y gegen die andere verschiebt und die algebraische Summe der Ordinaten dieser zwei Kurven sucht; Fig. 17 zeigt hiervon ein Beispiel. Es folgt sowohl aus der Figur wie von selbst, dass in zwei Spulen, von denen die Spulenweite der einen um ebensoviel kleiner wie die der anderen grösser ist als τ, dieselbe E.M.K. induziert werden muss.

Als drittes Beispiel betrachten wir eine Dreiphasen-Zweilochwicklung in einem Gleichpolfeld. Hier sind nicht alle Spulenseiten identisch, sondern nur die Spulen, weshalb wir die Betrachtung hier über eine Spule ausdehnen müssen. Wir superponieren erst die E.M.K. zweier Spulenseiten, die um eine Polteilung auseinander liegen; die resultierende Kurve ist identisch mit der $\Delta\, B_x$-Kurve und für diese bestimmen wir den Effektivwert; alsdann superponieren wir die in

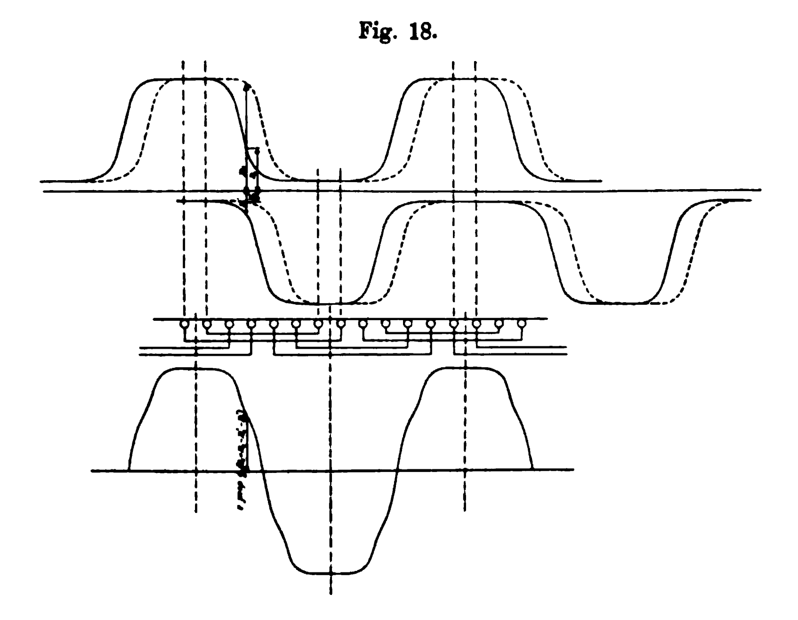
allen vier Spulenseiten induzierten E.M.Ke. oder vier Feldintensitätskurven (siehe Fig. 18) und berechnen dafür den Effektivwert. Durch

Fig. 17.



Division dieses letzten Effektivwertes mit dem doppelten Effektivwert der ΔB_x-Kurve erhält man f_w.

Fig. 18.



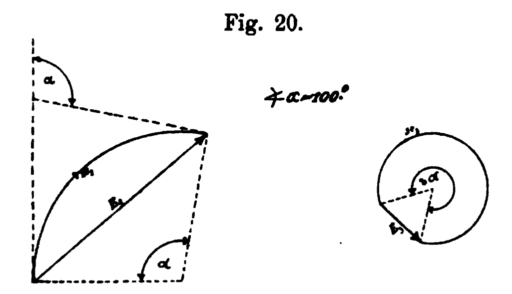
Die zweite, die rechnerische Methode zur Bestimmung von f_w benützt man, wie gesagt, da, wo man für ein und dasselbe

Feld die Wicklungsfaktoren mehrerer Wicklungen zu bestimmen hat. Ist das Feld ein in Bezug auf die Abscissenachse symmetrisches Wechselfeld, so hat die in jedem Stabe induzierte E.M.K. dieselbe Kurvenform wie die Feldintensitätskurve, weshalb man diese nach Fourier in eine Summe von Sinuswellen auflöst. Ist das Feld ein Gleichpolfeld oder ein unsymmetrisches Wechselpolfeld, so wird in

Fig. 19.

einer Einlochspule mit $y = \tau$ eine E.M.K. (e) induziert, die dieselbe Kurvenform hat wie ΔB_x und deswegen löst man diese Kurve nach Fourier auf. Wenn wir uns im folgenden zuerst auf die Wicklungen beschränken, bei denen die Mitte der Spulenseite einer Phase um eine Polteilung von der Mitte der nächsten Spulenseite derselben Phase entfernt ist, so müssen der positive Teil und der negative Teil der

Fig. 20.



E.M.K.-Kurve stets symmetrisch werden, selbst wenn die positiven und die negativen Felder, wie bei einer Folgepolmaschine, verschieden sind.

Die in einem Stab oder in einer Spule mit $y = \tau$ induzierte E.M.K. kann dann in der Form

$$e_x = e_1 \sin(\omega t) + e_3 \sin(3\omega t) + e_5 \sin(5\omega t) + \ldots$$

geschrieben werden, weil die Feldintensitätskurven bei Leerlauf in

Bezug auf eine maximale Ordinate symmetrisch sind. ω ist gleich $2\pi c$, wo c die Periodenzahl bedeutet.

Betrachten wir nun wieder die Einphasen-Vierlochwicklung, so sind die in den vier Spulenseiten induzierten E.M.Ke.

$$e_x = e_1 \sin \omega t + e_3 \sin 3\omega t + \ldots,$$

$$e_{x+\alpha} = e_1 \sin(\omega t + \alpha) + e_3 \sin 3(\omega t + \alpha) + \ldots,$$

$$e_{x+2\alpha} = e_1 \sin(\omega t + 2\alpha) + e_3 \sin 3(\omega t + 2\alpha) + \ldots$$

und

$$e_{x+3\alpha} = e_1 \sin(\omega t + 3\alpha) + e_3 \sin 3(\omega t + 3\alpha) + \ldots,$$

wo

$$\alpha = \frac{\text{Lochdistanz}}{\tau}\pi.$$

Hieraus sieht man, dass die vier E.M.Ke. der Grundwelle um α gegeneinander verschoben sind, und die der dritten Harmonischen um 3α u. s. w., woraus folgende Konstruktion für die Bestimmung der Amplituden der Harmonischen der E.M.K.-Kurve hervorgeht (siehe Fig. 19).

Bei glatten Armaturen geht der Linienzug des elektromotorischen Kräftepolygons in einen Kreisbogen mit dem Zentriwinkel α über, wenn die Wicklung über den Winkel $\alpha = \frac{S}{\tau}\pi$ einer Polteilung gleichmässig verteilt ist; S gleich Breite einer Spulenseite. Man erhält aus Fig. 20

$$s e_1 = R\alpha,$$

$$E_1 = 2R \sin\frac{\alpha}{2},$$

also

$$E_1 = \frac{2\sin\frac{\alpha}{2}}{\alpha} s e_1.$$

Ebenso findet man

$$E_3 = \frac{2\sin 3\frac{\alpha}{2}}{3\alpha} s e_3,$$

$$E_5 = \frac{2\sin 5\frac{\alpha}{2}}{5\alpha} s e_5 \ldots \text{ u. s. w.}$$

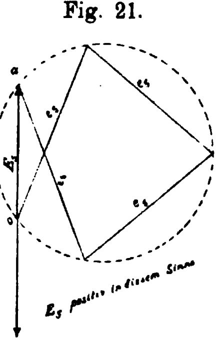
Man kann die Gleichung für die E.M.K.-Kurve auch schreiben

$$E_{mom} = E_1 \sin(\omega t') + E_3 \sin 3\omega t' + E_5 \sin 5\omega t' + \ldots,$$

wo $\omega t' = \omega t + \text{Konst. } \alpha$.

Die Vorzeichen von E_1, E_3, E_5 u. s. w. ergeben sich aus den Gleichungen derselben. Bei der graphischen Konstruktion dieser Grössen ist zu beachten, dass eine ungerade Anzahl Umläufe in dem elektromotorischen Kräftepolygon das Vorzeichen der Resultierenden ändert (Fig. 21).

Fig. 21.



In Fig. 21 hat man z. B. einen Umlauf gemacht und noch das Stück o a zurückgelegt, deswegen wird E_5 negativ.

Im folgenden sind nun die Werte für die verschiedenen Wicklungen zusammengestellt, mit welchen man $s\,e_1$, $s\,e_3$, $s\,e_5$ u. s. w. multiplizieren muss, um die Werte E_1, E_3, E_5 u. s. w. zu bekommen; wir bezeichnen

$$f_{w1} = \frac{E_1}{s\,e_1} = \text{Wicklungsfaktor für ein sinusförmiges Feld,}$$

$$f_{w3} = \frac{E_3}{s\,e_3},$$

$$f_{w5} = \frac{E_5}{s\,e_5} \text{ u. s. w.}$$

Lochwicklungen					Verteilte Wicklungen			
Anzahl Löcher pro Pol und Phase, q =		2	3	4	$\frac{S}{\tau} = \frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	1
Ein- u. Zweiphasenwicklungen mit 2q-Löcher pro Pol	f_{w1}	0,924	0,91	0,906	—	0,901	—	0,636
	f_{w3}	0,383	0,333	0,318	—	0,30	—	− 0,212
	f_{w5}	− 0,383	− 0,244	− 0,213	—	− 0,18	—	0,127
	f_{w7}	− 0,924	− 0,333	− 0,180	—	− 0,129	—	− 0,091
Ein- u. Dreiphasenwicklungen mit 3q-Löcher pro Pol	f_{w1}	0,966	0,96	0,958	0,956	—	0,830	0,636
	f_{w3}	0,707	0,67	0,654	0,636	—	0	− 0,212
	f_{w5}	0,259	0,217	0,065	0,191	—	− 0,165	0,127
	f_{w7}	− 0,259	− 0,177	− 0,158	− 0,273	—	0,119	− 0,091

Kennt man also die Amplituden e_1, e_3, e_5 und e_7 der Harmonischen einer Feldintensitätskurve, so findet man für eine bestimmte Wicklung die entsprechenden

$$E_1 = f_{w1}\,q\,e_1;\quad E_3 = f_{w3}\,q\,e_3\;\ldots,$$

und

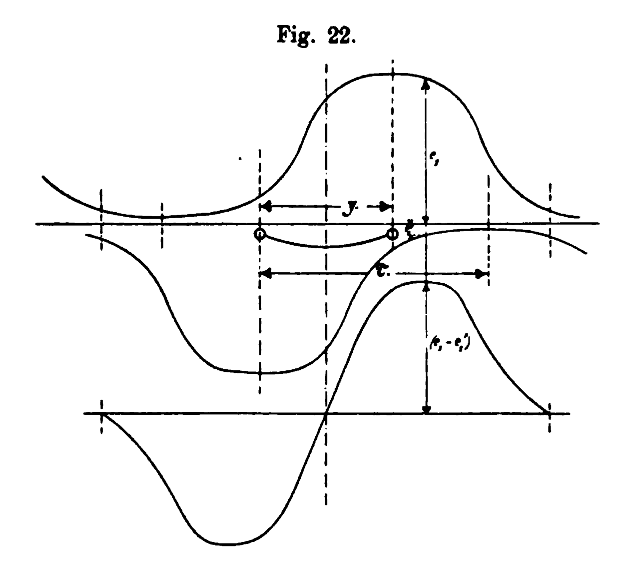
$$f_w = \frac{E}{q\,e} = \frac{\sqrt{\frac{1}{2}(E_1{}^2 + E_3{}^2 + E_5{}^2 + E_7{}^2)}}{q\sqrt{\frac{1}{2}(e_1{}^2 + e_3{}^2 + e_5{}^2 + e_7{}^2)}}$$

$$= \sqrt{\frac{\left(\frac{E_1}{q}\right)^2 + \left(\frac{E_3}{q}\right)^2 + \left(\frac{E_5}{q}\right)^2 + \left(\frac{E_7}{q}\right)^2}{e_1{}^2 + e_3{}^2 + e_5{}^2 + e_7{}^2}},$$

$$f_w = \sqrt{\frac{(e_1 f_{w1})^2 + (e_3 f_{w3})^2 + (e_5 f_{w5})^2 + (e_7 f_{w7})^2}{e_1{}^2 + e_3{}^2 + e_5{}^2 + e_7{}^2}}.$$

Wir gehen nun zur Betrachtung der Wicklungen über, deren Abstand der Spulenseitenmitten $\gtrless \tau$ ist. Diese sind am besten nach der ersten, der graphischen Methode zu behandeln. Wicklungen dieser

Fig. 22.



Art sind die Spulenwicklungen mit ungekreuzten kurzen Spulen für Zackenarmaturen. Sie werden jedoch wenig gebraucht und es ist deswegen hier nur nötig, zu erwähnen, dass die in diesen Wicklungen induzierten E.M.Ke. in Bezug auf die Abscissenachse so lange symmetrisch sind, als die Wechselfelder es auch sind. Werden dagegen solche Spulen in einem Gleichpolfelde oder in einem unsymmetrischen Wechselpolfelde (z. B. in dem Felde einer Folgepolmaschine) bewegt,

so wird in jeder Spule eine E.M.K. induziert, deren Kurve in Bezug auf die Abscissenachse unsymmetrisch ist, was man leicht aus folgender Fig. 22 sieht, die die Konstruktion der E.M.K.-Kurve zeigt.

V. Kapitel.

Die E.M.K.-Kurve und ihre Faktoren.

Wir haben gesehen, wie man die Form und die effektive Grösse der E.M.K. einer Phase finden kann, sowohl in graphischer Weise wie durch die Amplituden ihrer Harmonischen. Es kann aber auch oft von Interesse sein, einige charakteristische Grössen der E.M.K. zu kennen, nämlich das Verhältnis

$$\frac{\text{Effektivwert}}{\text{Mittelwert}} = \frac{E}{E_{mitt}} = f_E = \text{Formfaktor der E.M.K.-Kurve}$$

und

$$\frac{\text{Maximalwert}}{\text{Mittelwert}} = f = \text{Scheitelfaktor.}$$

Diese Verhältnisse kann man leicht rechnen; denn bei den symmetrischen Kurven ist

$$E_{mitt} = \frac{2}{\pi}\left(E_1 + \frac{1}{3} E_3 + \frac{1}{5} E_5 + \frac{1}{7} E_7\right)$$

und

$$E_{max} = E_1 - E_3 + E_5 - E_7.$$

Der Formfaktor f_E hat Einfluss auf die Eisenverluste in Transformatoren und Motoren; je grösser f_E, desto kleiner ist der Kraftfluss Z_{max} und desto kleiner werden daher die Eisenverluste bei derselben effektiven E.M.K. E. Der Scheitelfaktor f gibt ein Mass für die Beanspruchung der Isolationsmaterialien und hat Bedeutung für die Berechnung der Selbstinduktion der Armaturwicklung.

Bisher haben wir nur die E.M.Ke. einer Phase, die sogenannte Phasenspannung, berechnet; von grösserem Interesse sind aber die verketteten Spannungen bei den Mehrphasensystemen; diese ergeben sich einfach durch graphische Zusammensetzung der Amplituden der Harmonischen zweier Phasen unter den richtigen Winkeln.

Sind E_1^p, E_3^p, E_5^p und E_7^p die Amplituden einer Phasenspannung,

so sind die Amplituden der verketteten Spannung eines Zwei- oder Vierphasensystemes

$$E_1^a = \sqrt{2}\, E_1^p; \qquad E_3^a = -\sqrt{2}\, E_3^p;$$
$$E_5^a = -\sqrt{2}\, E_5^p \quad \text{und} \quad E_7^a = \sqrt{2}\, E_7^p;$$

woraus folgt

$$\mathrm{E}^a = \sqrt{2}\, \mathrm{E}^p$$

und die Amplituden der verketteten Spannung eines Dreiphasensystemes

$$E_1^a = \sqrt{3}\, E_1^p; \quad E_3^a = 0;$$
$$E_5^a = -\sqrt{3}\, E_5^p; \quad E_7^a = -\sqrt{3}\, E_7^p; \quad E_9^a = 0.$$

Also wird im allgemeinen für einen Dreiphasenstrom

$$\mathrm{E}^a = \mathrm{f_Y}\, \mathrm{E}^p < \sqrt{3}\, \mathrm{E}^p$$

und nur für eine Phasenspannung, die keine Harmonischen dritter, neunter und fünfzehnter Ordnung enthält, wird

$$\mathrm{E}^a = \sqrt{3}\, \mathrm{E}^p;$$

ferner kann man setzen

$$\mathrm{f_Y} \,.\, \mathrm{k} = \mathrm{k_Y},$$

so dass die verkettete Spannung eines Dreiphasengenerators

$$\mathrm{E}^a = 4\, \mathrm{k_Y}\, \mathrm{c}\, \mathrm{w}\, \mathrm{Z_{max}}\, 10^{-8}.$$

Dass die dritten, neunten u. s. w. Harmonischen in der verketteten Spannung verschwinden, bedeutet, dass diese Harmonischen in allen Phasen vom neutralen Punkte aus gleichgerichtet sind und deswegen in der verketteten Spannung einer Sternschaltung nicht zur Wirkung kommen. Schaltet man die Wicklung des Generators im Dreieck, so werden diese Harmonischen (dritten, neunten u. s. w.) nicht mehr paarweise gegengeschaltet, sondern alle in Serie, und werden daher einen Kurzschlussstrom in der Wicklung erzeugen, der aus Harmonischen der dreifachen, neunfachen u. s. w. Periodenzahlen der Grundwelle besteht.

VI. Kapitel.

Beispiele und Koëffizienten.

Nachdem jetzt die Berechnungsweise der in einer Armaturwicklung induzierten E.M.K. angegeben worden ist, werden wir einige Koëffizienten und Verhältnisse angeben für die häufigst vorkommenden Pol- und Wicklungsanordnungen, die als Anhaltspunkte sowohl für praktische wie mehr theoretische Berechnungen dienen können.

Auf die Form der Polintensitätskurve hat das Verhältnis Polbogen b durch Abstand zweier Polmitten d den grössten Einfluss; dies Verhältnis bezeichnen wir mit α und wir werden finden, dass es bei den Wechselpoltypen kleiner ist als α_i, während es bei den Gleichpoltypen beinahe immer grösser ausfallen wird. Ferner ist noch das Verhältnis zwischen dem Luftzwischenraume δ und dem Polbogen b, das Verhältnis zwischen Polschuhhöhe und Polbogen und die Grösse der Abrundung der Polschuhecken von Einfluss. Für die im folgenden betrachteten Polanordnungen ist das Verhältnis zwischen der Polschuhhöhe und dem Polbogen überall gleich $^1/_5$ und das Verhältnis zwischen dem Krümmungsradius der Polschuhecken und der Polschuhhöhe gleich 0,3 gesetzt, welche Verhältnisse auch in der Fig. 3 angewandt wurden. Der Armaturdurchmesser wurde gleich unendlich und die Länge der Polschuhe doppelt so gross wie die Polbogen angenommen.

Für das Verhältnis $\frac{\delta}{b} = \frac{1}{25}$, entsprechend 8 mm Luftzwischenraum bei 20 cm Polbogen, sind die Feldintensitätskurven einer Wechselpoltype nach der genaueren praktischen Vorausberechnungsmethode bei den verschiedenen $\alpha = 0{,}75$, 0,65, 0,55, 0,45 und 0,35 gerechnet und aufgezeichnet; ausserdem ist noch, um den Einfluss von δ bei konstantem $\alpha = 0{,}55$ zu zeigen, für $\frac{\delta}{b} = \frac{1}{16{,}6}$, $\frac{1}{25}$ und $\frac{1}{50}$ die Feldintensitätskurve auch bei der Wechselpoltype berechnet.

Bei den Gleichpoltypen, wo man kleinere Lufträume verwendet, sind die Feldintensitätskurven berechnet erstens für $\frac{\delta}{b} = \frac{1}{50}$ und $\alpha = 0{,}5$, 0,45, 0,4 und 0,35 und zweitens für $\alpha = 0{,}45$ und $\frac{\delta}{b} = \frac{1}{50}$ und $\frac{1}{25}$.

Die so erhaltenen Feldintensitätskurven der Wechselpoltype sind alsdann in ihre Harmonischen zerlegt worden, während sie bei den Gleichpoltypen benützt worden sind, um die ΔB_x-Kurven zu konstruieren, welch letztere dann ebenfalls in ihre Harmonischen aufgelöst wurden.

In Tabelle I sind die so erhaltenen Werte eingetragen, die für Einlochwicklungen mit $y = \tau$ direkt anwendbar sind, weil für diese die E.M.K.-Kurve und die Feldintensitätskurve die gleiche ist. α_i ist der Füllungsfaktor; f_B ist gleichzeitig der Formfaktor der Feldintensitätskurve und der der E.M.K.-Kurve einer Phase der Einlochwicklungen, da in diesem Falle $k = f_B \,.\, f_w = f_B = f_E$. f ist der Scheitelfaktor der E.M.K.-Kurve einer Phase, wie auch die Amplituden der Harmonischen E_1^p, E_3^p, E_5^p und E_7^p nur für eine Phase gelten. Die Amplituden der Harmonischen der verketteten Spannungen sind nach den im V. Kapitel angegebenen Formeln leicht zu berechnen. Die letzten Zeilen der Tabelle I geben die Faktoren f_E der verketteten Spannungskurve eines Zweiphasen- und eines Dreiphasengenerators an; für die Dreiphasensternschaltung ist ferner das Verhältnis f_Y zwischen E^a und E^p angegeben und der Faktor $k_Y = f_B \,.\, f_w \,.\, f_Y$ ausgerechnet; ferner ist der Scheitelfaktor f des Phasenstromes einer Dreiphasensternschaltung berechnet, indem als Stromkurve diejenige der E.M.K.-Kurve unter Vernachlässigung der dritten u. s. w. Harmonischen angenommen wurde.

In den Tabellen II bis XI sind dieselben Koëffizienten für die verschiedenen Wicklungen zusammengestellt, und überall ist $E_1^p = 100$ gesetzt. Diese Tabellen zeigen erstens, dass der Wicklungsfaktor f_w, wie früher erwähnt, hauptsächlich von der Wicklung abhängt und von der Feldintensitätskurve wenig beeinflusst wird. Deswegen kann man mit grosser Annäherung für irgend eine Pol- und Wicklungsanordnung den Faktor k oder k_Y schnell berechnen, indem man nach der einfachen Methode durch Berechnung von $\left(\frac{b_x}{a_x \, \delta_x}\right)$ die Feldintensitätskurve aufzeichnet und f_B aus dieser ermittelt, während f_w und f_Y aus der Tabelle für die betreffende Wicklung entnommen werden können.

Zweitens kann man mittels dieser Tabellen die Aufgabe beantworten: Es sei eine bewickelte Armatur gegeben, und es ist das Feld zu bestimmen, welches die grösstmögliche E.M.K. E_a in der vorhandenen Wicklung induziert.

Mit der Armatur ist auch B_δ gegeben, weil man mit der Zahn-

Tabelle I.

Einlochwicklungen. $y = \tau$.

		Wechselpoltyp							Gleichpoltyp				
	$\frac{\delta}{b}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{16{,}6}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$
	α	0,75	0,65	0,55	0,55	0,55	0,45	0,35	0,50	0,45	0,45	0,40	0,35
Einphasen	α_i	0,773	0,682	0,604	0,587	0,552	0,486	0,382	0,447	0,428	0,424	0,389	0,345
	$f_B = f_E = k$	1,097	1,158	1,215	1,235	1,280	1,358	1,530	1,020	1,042	1,053	1,092	1,157
	f	1,18	1,26	1,36	1,37	1,42	1,52	1,71	1,08	1,11	1,11	1,17	1,26
	E_1^p	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	E_3^p	+ 15,8	+ 2,3	− 11,7	− 13,9	− 22,5	− 34,2	− 56,0	+ 28,7	+ 25,3	+ 26,0	+ 16,6	+ 3,2
	E_5^p	− 3,4	− 14,5	− 17,3	− 19,3	− 19,8	− 12,8	+ 7,7	+ 14,0	+ 9,2	+ 10,5	− 3,0	− 14,7
	E_7^p	− 8,5	− 8,7	− 0,25	+ 1,0	+ 5,7	+ 14,0	+ 15,5	+ 7,6	+ 0,77	+ 3,5	− 1,0	− 10,7
Zweiphasen	f_E	1,20	1,18	1,06	1,05	1,04	1,04	1,09	1,3	1,27	1,3	1,19	1,12
Dreiphasen	f_E	1,11	1,05	1,09	1,09	1,10	1,125	1,18	1,17	1,14	1,16	1,11	1,07
	f_Y	1,72	1,69	1,72	1,71	1,70	1,64	1,52	1,66	1,61	1,68	1,71	1,72
	$k_Y = f_Y . k$	1,88	1,94	2,07	2,11	2,17	2,22	2,33	1,69	1,675	1,78	1,86	1,99
	f	1,46	1,31	1,14	1,10	1,01	0,96	1,12	1,42	1,48	1,44	1,36	1,34

Tabelle II.

Zweilochwicklungen (4 Löcher pro Pol).

		Wechselpoltyp							Gleichpoltyp				
	$\frac{\delta}{b}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{16,6}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$
	α	0,75	0,65	0,55	0,55	0,55	0,45	0,35	0,50	0,45	0,45	0,40	0,35
Einphasen	f_w	0,914	0,916	0,909	0,905	0,892	0,878	0,822	0,886	0,899	0,884	0,914	0,915
	k	1,00	1,06	1,11	1,12	1,14	1,19	1,26	0,905	0,96	0,93	1,00	1,06
	f_E	1,08	1,08	1,11	1,12	1,14	1,19	1,28	1,12	1,09	1,09	1,08	1,08
	f	1,22	1,36	1,58	1,61	1,73	1,75	1,83	1,26	1,22	1,24	1,18	1,32
	E_1^p	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	E_3^p	+ 6,5	+ 1,0	− 4,9	− 5,8	− 9,3	− 14,2	− 22,1	+ 11,9	+ 10,5	+ 10,8	+ 6,9	+ 1,3
	E_5^p	+ 1,4	+ 6,0	+ 7,2	+ 8,0	+ 8,2	+ 5,3	− 3,2	− 5,8	− 3,8	− 4,4	+ 1,2	+ 6,1
	E_7^p	+ 8,5	+ 8,6	+ 0,3	− 1,0	− 5,7	− 13,8	− 15,5	− 7,6	− 0,8	− 3,5	+ 10,0	+ 10,7
Zweiphasen	f_E	1,13	1,12	1,11	1,12	1,12	1,10	1,08	1,16	1,15	1,16	1,14	1,12

Tabelle III.

Zweilochwicklungen (6 Löcher pro Pol).

		Wechselpoltyp							Gleichpoltyp				
	$\frac{\delta}{b}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{16{,}6}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$
	α	0,75	0,65	0,55	0,55	0,55	0,45	0,35	0,50	0,45	0,45	0,40	0,35
Einphasen	f_w	0,957	0,954	0,951	0,948	0,938	0,929	0,894	0,939	0,950	0,935	0,956	0,952
	k	1,05	1,11	1,16	1,17	1,20	1,26	1,37	0,96	0,99	0,99	1,04	1,10
	f_E	1,07	1,11	1,16	1,16	1,21	1,26	1,34	1,06	1,06	1,06	1,07	1,10
	f	1,20	1,30	1,46	1,48	1,56	1,72	1,94	1,17	1,16	1,17	1,19	1,28
	E_1^p	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	E_3^p	+ 11,6	+ 1,7	− 8,6	− 10,2	− 16,4	− 25,0	− 41,0	+ 21,0	+ 18,5	+ 19,0	+ 12,1	+ 2,3
	E_5^p	− 0,91	− 3,9	− 4,7	− 5,2	− 5,2	− 3,4	+ 2,1	+ 3,8	+ 2,4	+ 2,9	− 0,81	− 3,9
	E_7^p	+ 2,3	+ 2,3	+ 0,06	− 0,27	− 1,5	− 3,8	− 4,1	− 2,0	− 0,21	− 0,93	+ 2,7	+ 2,9
Dreiphasen	f_E	1,11	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,11	1,12	1,12	1,12	1,11	1,10
	f_Y	1,72	1,73	1,72	1,72	1,70	1,67	1,60	1,69	1,70	1,70	1,72	1,72
	$k_Y = k \cdot f_Y$	1,81	1,91	2,00	2,01	2,04	2,10	2,20	1,62	1,68	1,68	1,79	1,89
	f	1,36	1,32	1,34	1,34	1,34	1,38	1,40	1,40	1,42	1,44	1,36	1,32

Tabelle IV.

Dreilochwicklungen (6 Löcher pro Pol).

		Wechselpoltyp							Gleichpoltyp				
	$\frac{\delta}{b}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{16,6}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$
	α	0,75	0,65	0,55	0,55	0,55	0,45	0,35	0,50	0,45	0,45	0,40	0,35
Einphasen	f_w	0,897	0,90	0,888	0,890	0,877	0,856	0,797	0,870	0,883	0,868	0,895	0,897
	k	0,985	1,04	1,08	1,10	1,12	1,16	1,22	0,89	0,92	0,915	0,98	1,04
	f_E	1,08	1,10	1,11	1,13	1,14	1,17	1,25	1,09	1,08	1,09	1,08	1,10
	f	1,30	1,40	1,54	1,58	1,63	1,70	1,72	1,24	1,24	1,25	1,28	1,39
	E_1^p	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	E_3^p	+ 5,8	+ 0,85	− 4,3	− 5,1	− 8,2	− 12,6	− 20,5	+ 10,5	+ 9,3	+ 9,5	+ 6,1	+ 1,2
	E_5^p	+ 0,91	+ 3,9	+ 4,6	+ 5,2	+ 5,4	+ 3,4	− 2,06	− 3,8	− 2,5	− 2,8	+ 0,80	+ 3,9
	E_7^p	+ 3,1	+ 3,1	+ 0,09	− 0,36	− 2,1	− 5,1	− 5,7	− 2,8	− 0,29	− 1,28	+ 3,7	+ 4,0
Zweiphasen	f_E	1,13	1,12	1,11	1,10	1,10	1,08	1,06	1,16	1,14	1,15	1,13	1,12

Tabelle V.

Dreilochwicklungen (9 Löcher pro Pol).

		Wechselpoltyp							Gleichpoltyp				
	$\frac{\delta}{b}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{16,6}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$
	α	0,75	0,65	0,55	0,55	0,55	0,45	0,35	0,50	0 45	0,45	0,40	0,35
Einphasen	f_w	0,95	0,948	0,943	0,941	0,931	0,918	0,884	0,931	0,942	0,926	0,948	0,946
	k	1,04	1,10	1,145	1,16	1,19	1,25	1,35	0,95	0,98	0,98	1,035	1,095
	f_E	1,08	1,12	1,16	1,17	1,20	1,26	1,37	1,06	1,06	1,07	1,08	1,09
	f	1,22	1,32	1,47	1,48	1,58	1,72	1,88	1,17	1,18	1,18	1,20	1,30
	$E_1{}^p$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	$E_3{}^p$	+ 11,0	+ 1,6	− 8,1	− 9,7	− 16,8	− 24,9	− 39,0	+ 20,0	+ 17,7	+ 18,1	+ 11,6	+ 2,2
	$E_5{}^p$	− 0,77	− 3,2	− 3,9	− 4,4	− 4,5	− 2,9	+ 1,7	+ 3,2	+ 2,1	+ 2,4	− 0,68	− 3,3
	$E_7{}^p$	+ 1,7	+ 1,7	+ 0,04	− 0,18	− 1,0	− 2,6	− 2,9	− 1,4	− 0,14	− 0,65	+ 1,8	+ 2,0
Dreiphasen	f_E	1,11	1,11	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,11	1,12	1,11	1,11	1,11
	f_Y	1,72	1,73	1,72	1,72	1,71	1,68	1,61	1,69	1,70	1,70	1,72	1,73
	$k_Y = f_Y . k$	1,79	1,88	1,96	2,00	2,04	2,10	2,17	1,61	1,67	1,66	1,78	1,89
	f	1,37	1,34	1,35	1,34	1,35	1,37	1,37	1,45	1,42	1,44	1,37	1,34

Tabelle VI.

Vierlochwicklungen (8 Löcher pro Pol).

		Wechselpoltyp							Gleichpoltyp				
	$\frac{\delta}{b}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{16,6}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$
	α	0,75	0,65	0,55	0,55	0,55	0,45	0,35	0,50	0,45	0,45	0,40	0,35
Einphasen	f_w	0,893	0,895	0,89	0,887	0,871	0,851	0,792	0,866	0,879	0,865	0,892	0,893
	k	0,89	1,035	1,08	1,095	1,115	1,155	1,21	0,88	0,92	0,91	0,98	1,035
	f_E	1,09	1,10	1,12	1,12	1,14	1,16	1,22	1,09	1,09	1,09	1,09	1,10
	f	1,32	1,41	1,53	1,54	1,59	1,65	1,68	1,20	1,25	1,25	1,31	1,41
	E_1^p	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	E_3^p	+ 5,5	+ 0,8	− 4,1	− 4,9	− 7,9	− 12,0	− 19,7	+ 10,0	+ 8,9	+ 9,1	+ 5,8	+ 1,1
	E_5^p	+ 0,8	+ 3,4	+ 4,1	+ 4,5	+ 4,6	+ 3,0	− 1,8	− 3,3	− 2,2	− 2,5	+ 0,7	+ 3,4
	E_7^p	+ 1,7	+ 1,7	+ 0,05	− 0,2	− 1,1	− 2,8	− 3,1	− 1,5	− 0,15	− 0,7	+ 2,0	+ 2,1
Zweiphasen	f_E	1,13	1,12	1,10	1,10	1,10	1,09	1,08	1,15	1,14	1,15	1,14	1,12

Tabelle VII.

Vierlochwicklungen (12 Löcher pro Pol).

		Wechselpoltyp							Gleichpoltyp				
	$\frac{\delta}{b}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{16{,}6}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$
	α	0,75	0,65	0,55	0,55	0,55	0,45	0,35	0,50	0,45	0,45	0,40	0,35
Einphasen	f_w	0,948	0,946	0,942	0,940	0,928	0,916	0.878	0,928	0,939	0,924	0,946	0,944
	k	1,04	1,095	1,145	1,16	1,19	1,24	1,34	0,95	0,98	0,975	1,03	1,09
	f_E	1,17	1,12	1,09	1,08	1,07	1,06	1,05	1,20	1,20	1,20	1,17	1,13
	f	1,25	1,36	1,50	1,53	1,58	1,71	1,86	1,14	1,16	1,16	1,22	1,34
	E_1^p	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	E_3^p	+ 10,8	+ 1,7	− 8,0	− 9,5	− 15,3	− 23,5	− 38,2	+ 19,6	+ 17,2	+ 17,8	+ 11,4	+ 2,2
	E_5^p	− 0,23	− 0,98	− 1,2	− 1,3	− 1,4	− 0,87	+ 0,52	+ 0,94	+ 0,63	+ 0,71	− 0,20	− 1,0
	E_7^p	+ 1,4	+ 1,4	+ 0,04	− 0,17	− 0,94	− 2,2	− 2,6	− 1,3	− 0,13	− 0,57	+ 1,6	+ 1,8
Dreiphasen	f_E	1,12	1,11	1,11	1,11	1,10	1,10	1,10	1,11	1,12	1,12	1,12	1,12
	f_Y	1,72	1,73	1,73	1,72	1,71	1,67	1,62	1,70	1,71	1,70	1,72	1,73
	$k_Y = f_Y \cdot k$	1,79	1,87	1,98	2,00	2,04	2,07	2,17	1,60	1,67	1,66	1,78	1,89
	f	1,38	1,39	1,39	1,39	1,40	1,40	1,36	1,42	1,40	1,41	1,38	1,37

Tabelle VIII.

Wicklungen mit gleichmässig verteilten Spulen über ein Drittel der Polteilung.

$$\frac{S}{\tau} = \frac{1}{3}.$$

		Wechselpoltyp							Gleichpoltyp				
	$\frac{\delta}{b}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{16,6}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$
	α	0,75	0,65	0,55	0,55	0,55	0,45	0,35	0,50	0,45	0,45	0,40	0,35
Einphasen	f_w	0,946	0,945	0,940	0,938	0,927	0,914	0,875	0,926	0,937	0,922	0,944	0,942
	k	1,035	1,09	1,14	1,16	1,19	1,24	1,34	0,945	0,88	0,975	1,03	1,09
	f_E	1,08	1,10	1,14	1,18	1,20	1,25	1,36	1,05	1,07	1,07	1,08	1,11
	f	1,21	1,31	1,48	1,48	1,56	1,70	1,85	1,19	1,19	1,14	1,20	1,26
	E_1^p	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	E_3^p	+ 10,4	+ 1,5	− 7,8	− 9,3	− 15,0	− 22,7	− 37,3	+ 19,1	+ 16,8	+ 17,2	+ 11,0	+ 2,1
	E_5^p	− 0,68	− 2,9	− 3,5	− 3,8	− 4,1	− 2,6	+ 1,5	+ 2,8	+ 1,9	− 2,1	− 0,6	− 3,0
	E_7^p	+ 2,4	+ 2,5	+ 0,73	− 0,28	− 1,6	− 3,5	− 4,4	− 2,2	− 0,22	− 2,0	+ 2,8	+ 3,1
Dreiphasen	f_E	1,11	1,10	1,10	1,10	1,10	1,11	1,11	1,12	1,12	1,12	1,12	1,11
	f_Y	1,72	1,72	1,73	1,72	1,71	1,68	1,62	1,70	1,71	1,70	1,72	1,73
	k_Y	1,77	1,88	1,97	2,00	2,04	2,08	2,17	1,60	1,68	1,66	1,75	1,89
	f	1,38	1,34	1,37	1,36	1,36	1,39	1,40	1,46	1,42	1,38	1,36	1,32

Tabelle IX.

Wicklungen mit gleichmässig verteilten Spulen über die Hälfte der Polteilung.

$$\frac{S}{\tau} = \frac{1}{2}.$$

		Wechselpoltyp							Gleichpoltyp				
	$\frac{\delta}{b}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{16,6}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$
	α	0,75	0,65	0,55	0,55	0,55	0,45	0,35	0,50	0,45	0,45	0,40	0,35
Einphasen	f_w	0,888	0,890	0,884	0,882	0,866	0,845	0,785	0,861	0,874	0,859	0,887	0,886
	k	0,87	1,03	1,075	1,09	1,11	1,15	1,20	0,88	0,91	0,905	0,97	1,025
	f_E	1,09	1,10	1,12	1,12	1,13	1,16	1,21	1,09	1,09	1,09	1,09	1,10
	f	1,32	1,42	1,51	1,52	1,58	1,63	1,66	1,25	1,26	1,26	1,32	1,41
	E_1^p	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	E_3^p	+ 5,3	+ 0,77	− 4,0	− 4,6	− 7,5	− 11,4	− 18,6	+ 9,5	+ 8,4	+ 8,6	+ 5,4	+ 1,1
	E_5^p	+ 0,68	+ 2,9	+ 3,4	+ 3,8	+ 3,9	+ 2,6	− 1,5	− 2,8	− 1,8	− 2,1	+ 0,6	+ 2,9
	E_7^p	+ 1,2	+ 1,2	+ 0,04	− 0,14	− 0,81	− 2,0	− 2,2	− 1,1	− 0,11	− 0,50	+ 1,4	+ 1,5
Zweiphasen	f_E	1,13	1,12	1,10	1,10	1,10	1,09	1,06	1,15	1,14	1,14	1,13	1,12

Tabelle X.

Wicklungen mit gleichmässig verteilten Spulen über zwei Drittel der Polteilung.

$$\frac{S}{\tau} = \frac{2}{3}.$$

		Wechselpoltyp							Gleichpoltyp				
	$\frac{\delta}{b}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{16,6}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$
	α	0,75	0,65	0,55	0,55	0,55	0,45	0,35	0,50	0,45	0,45	0,40	0,35
Einphasen	f_w	0,826	0,828	0,823	0,819	0,803	0,782	0,719	0,798	0,810	0,797	0,823	0,826
	k	0,905	0,96	1,00	1,01	1,03	1,06	1,10	0,815	0,845	0,84	0,90	0,955
	f_E	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,12	1,12	1,12	1,12	1,11
	f	1,44	1,47	1,46	1,46	1,46	1,41	1,36	1,36	1,38	1,37	1,44	1,47
	$E_1{}^p$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	$E_3{}^p$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	$E_5{}^p$	+ 0,67	+ 2,9	+ 3,4	+ 3,8	+ 3,9	+ 2,5	— 1,5	— 2,8	— 1,8	— 2,1	+ 0,59	+ 2,8
	$E_7{}^p$	— 1,2	— 1,2	— 0,36	+ 0,14	+ 0,81	+ 2,0	+ 2,2	+ 1,1	+ 0,10	+ 0,5	— 1,4	— 1,5
Dreiphasen	f_E	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,11	1,11	1,11	1,11	1,12
	f_Y	1,73	1,73	1,73	1,75	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73
	$k_Y = f_Y . k$	1,57	1,66	1,73	1,75	1,78	1,83	1,90	1,39	1,46	1,45	1,56	1,65
	f	1,44	1,47	1,46	1,46	1,46	1,41	1,36	1,36	1,38	1,37	1,44	1,47

Tabelle XI.

Wicklungen mit gleichmässig verteilten Spulen über die ganze Polteilung.

$$\frac{S}{\tau} = 1.$$

		Wechselpoltyp							Gleichpoltyp				
Einphasen	$\frac{\delta}{b}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{16,6}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$
	α	0,75	0,65	0,55	0,55	0,55	0,45	0,35	0,50	0,45	0,45	0,40	0,35
	f_w	0,627	0,629	0,623	0,622	0,610	0,596	0,554	0,607	0,617	0,606	0,626	0,626
	k	0,69	0,73	0,76	0,77	0,78	0,81	0,85	0,62	0,64	0,64	0,68	0,72
	f_E	1,13	1,12	1,12	1,10	1,09	1,10	1,06	1,15	1,14	1,15	1,13	1,12
	f	1,46	1,36	1,31	1,29	1,26	1,24	1,18	1,59	1,56	1,56	1,48	1,35
	E_1^p	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	E_3^p	− 5,3	− 0,77	+ 3,9	+ 4,6	+ 7,5	+ 11,4	+ 18,7	− 9,6	− 8,4	− 8,6	− 5,5	− 1,1
	E_5^p	− 0,68	− 2,9	− 3,5	− 3,9	− 3,9	− 2,6	+ 1,54	+ 2,8	+ 1,8	+ 2,1	− 0,6	− 2,9
	E_7^p	+ 1,2	+ 1,2	− 0,04	+ 0,14	+ 0,82	− 2,0	− 2,2	− 1,1	− 0,11	− 0,50	+ 1,4	+ 1,5

sättigung nicht beliebig hoch gehen kann. Man kann also zur Beantwortung der Frage die Formel

$$E^p = 4 f_B . f_w . c . w . B_\delta . \tau . l . \alpha_i \, 10^{-8} = f_B . \alpha_i . \text{Konstante}$$

benützen.

Da die in einer Phase induzierte E.M.K. E^p ihr Maximum besitzt, wenn $f_B . \alpha_i$ im Maximum ist, so stellen wir das Produkt $f_B . \alpha$ für die verschiedenen Polanordnungen zusammen.

Wechselpoltyp.

$\frac{\delta}{b}$ =	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{16,6}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$
α =	0,75	0,65	0,55	0,55	0,55	0,45	0,35
$f_B . \alpha_i$ =	0,85	0,79	0,73	0,72	0,71	0,66	0,58

Gleichpoltyp.

$\frac{\delta}{b}$ =	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$
α =	0,5	0,45	0,45	0,40	0,35
$f_B . \alpha_i$ =	0,46	0,45	0,45	0,42	0,40

Hieraus sieht man, dass ein magnetisches Wechselfeld mit breiten Polschuhen in dieser Hinsicht das günstigste ist. f_w ist aber oben in die Konstante hineinverlegt, trotzdem es keine Konstante ist, und um f_w für eine gegebene Wicklung möglichst gross zu machen, sollte man suchen, die Feldkurve möglichst sinusförmig zu gestalten, indem man α gleich ca. 0,7 macht und die Polschuhecken etwas abschrägt. Also fällt die Bedingung für einen grossen Faktor f_w ungefähr mit der Bedingung eines maximalen Wertes des Produktes $f_B . \alpha_i$ zusammen. Für ein annähernd sinusförmiges Feld erreicht f_Y auch seinen Maximalwert $\sqrt{3}$. — Ein grosser Füllungsfaktor α_i bewirkt einen grossen Kraftfluss Z_{max} und dadurch eine gedrungene Maschine mit viel Eisen und wenig Kupfer. Hier kommt aber noch eine Sache in Frage, nämlich die Feldstreuung, und bei gleichem Polbogen wird diese um so grösser sein, je grösser α gewählt wird; deswegen ist man mit α innerhalb gewisser Grenzen gebunden und findet im allgemeinen $\alpha = 0,55$ bis 0,65.

VII. Kapitel.

Experimentelle Untersuchung des Feldes und der E.M.K. eines Wechselstromgenerators bei Leerlauf.

Wünscht man bei einer ausgeführten Maschine die Koëffizienten f_B, f_w und α_i zu prüfen, so geschieht dies bei den Wechselpoltypen am besten durch folgende zwei Versuche:

1. Man misst die effektive E.M.K. einer Phase oder die Spannung an den Klemmen der Armatur, und

2. nimmt man die E.M.K.-Kurve einer Einlochwicklung mit $y = \tau$ auf. Ist eine solche entweder nicht vorhanden oder nicht gut zugänglich, so kann man oft ohne Schwierigkeit eine kleine Spule aus dünnem Drahte in die Nuten einbringen oder auf der Oberfläche des Armatureisens mit Hilfe von Stiften aufspannen.

Bei Gleichpoltypen muss man ausser diesen zwei Experimenten noch

3. die maximale Induktion B_δ unter einem Pole mittels einer Probespule messen.

Aus der E.M.K.-Kurve findet man f_B, α_i und e_{eff} eines Stabes; daraus folgt dann

$$f_w = \frac{E}{s \cdot e_{eff}}.$$

Bei einer Gleichpoltype findet man aus der E.M.K.-Kurve f_B und e_{eff} für die Einlochwicklung, also

$$f_w = \frac{E}{w \cdot e_{eff}}.$$

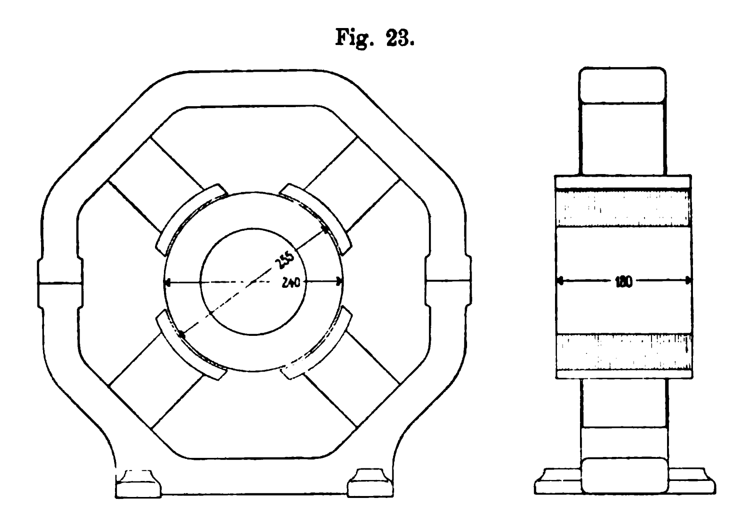
Indem B_δ hier gemessen wird, ergibt sich

$$\alpha_i = \frac{E_a\, 10^8}{4 \cdot f_B \cdot f_w \cdot c \cdot w \cdot B_\delta \cdot \tau \cdot l}.$$

Da eine Bestimmung von e_{eff} eine Eichung des Galvanometerausschlages bei der Aufnahme der E.M.K.-Kurve oder eine Messung der E.M.K. der Probespule erfordert, so kann es oft von Vorteil sein, besonders wenn man ganz genaue Resultate wünscht, mittels der aufgenommenen Feldintensitätskurve und den Wicklungsdaten den Faktor f_w auf rechnerischem Wege zu bestimmen, was hier exakt geschehen kann.

Nach dieser Methode wurde eine Einphasen-Wechselstrommaschine von Schuckert untersucht. Da noch weitere Untersuchungen mit dieser Maschine vorgenommen wurden, welche in den folgenden Kapiteln mitgeteilt werden, geben wir hier sofort die Hauptabmessungen der Maschine, wovon Fig. 23 ein Bild zeigt.

Fig. 23.



3,5 Kilowatt normale Leistung; 1500 Touren; 110 Volt; 32 Ampère; 4 Pole; 50 Perioden.

Glatter Anker mit einer über $^2/_5$ der Polteilung gleichmässig verteilten Drahtwicklung; 14 Windungen pro Pol; Breite der Spulenseiten S = 80 mm; Polteilung $\tau = 200$ mm, also $\frac{S}{\tau} = 0{,}4 = {}^2/_5$; $D_{aussen} = 240$ mm; D_{innen} ca. 140 mm; Länge der Armatur 180 mm.

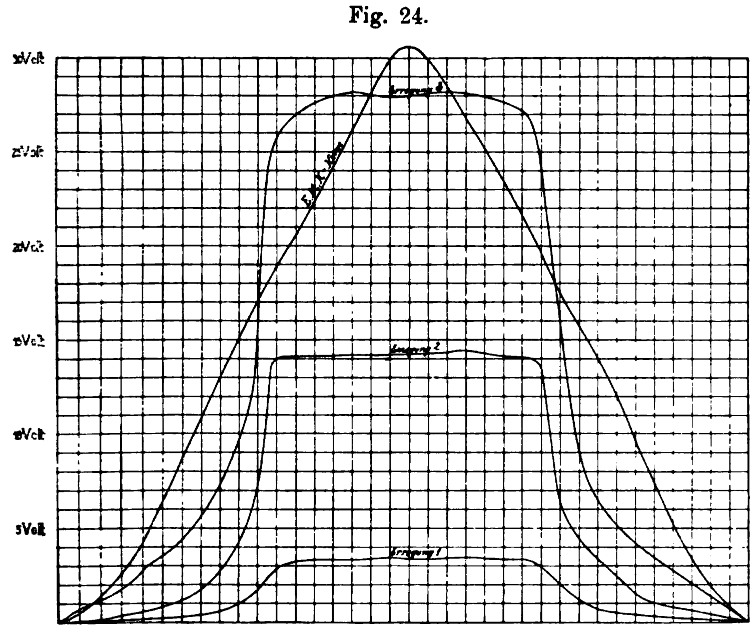
Magnete: Feldbohrung 255 mm; Polbogen normal 120 mm, also $\alpha = 0{,}6$; Höhe der Polschuhe 17,5 mm; Länge der Polschuhe 180 mm; Magnetkernquerschnitt 80 auf 112 mm; Magnetkernlänge 92,5 mm; Feldwindungen pro Pol 1440. Die aufgeschraubten Polschuhe haben scharfe Ecken.

Die alten Polschuhe wurden abgenommen und für den Versuch neue hergestellt. Diese letzteren besassen dieselbe Bohrung wie die alten, und waren alle aus einem einzigen gusseisernen Cylinder hergestellt. Der Reihe nach wurden sechs Sätze von Polschuhen mit einem Polbogen von 180, 160, 140, 120, 100 und 80 mm entsprechend $\alpha = 0{,}9$, 0,8, 0,7, 0,6, 0,5 und 0,4 aufgesetzt. Später wurden die Polschuhe mit einem Polbogen b = 120 mm so an den Ecken ab-

gerundet, dass der Krümmungsradius gleich 8 mm war und zuletzt wurden die Ecken derselben Polschuhe in der Weise abgeschrägt, dass der wirkliche Polbogen b sich zu 80 mm ergab. Mit diesen verschiedenen Polschuhen wurden folgende Versuche durchgeführt:

1. Aufnahme der Feldintensitätskurve mittels einer Probespule, die auf dem Anker mit Hilfe von Stiften aufgespannt war, bei drei verschiedenen Erregungen, nämlich bei 610, 2630 und 7125 Ampèrewindungen pro Pol. — Gleichzeitig wurde die effektive Spannung E

Fig. 24.



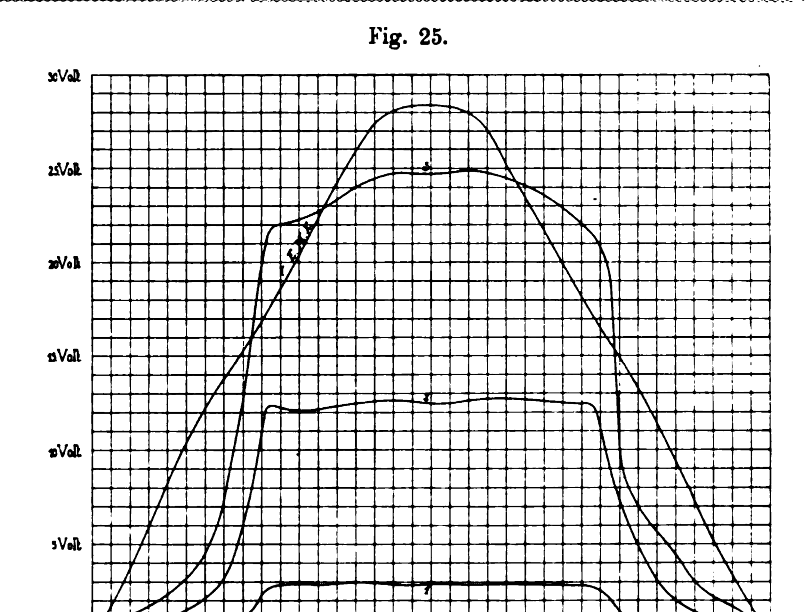
Polschuhe N°1, b-80 m/m

an den Klemmen der Einphasenwicklung mit einem Hitzdrahtvoltameter gemessen.

2. Aufnahme der E.M.K.-Kurve der Einphasenwicklung bei der Erregung 2.

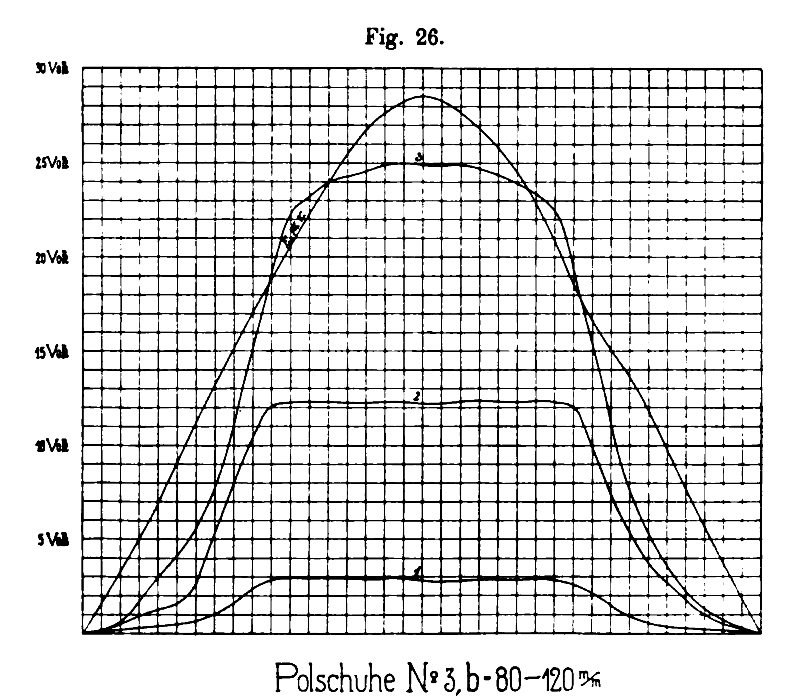
Diese aufgenommenen Kurven sind in den Fig. 24 bis 31 dargestellt und man sieht auch hier bei den breiten Polschuhen den Einfluss der elektromagnetischen Kraft $H_{n,x}$. Bei den Polschuhen mit dem Polbogen gleich 80 mm (gleich der Breite des Magnetkernes) erhält man dagegen keine Deformation der Feldkurve, was zu erwarten war.

Fig. 25.



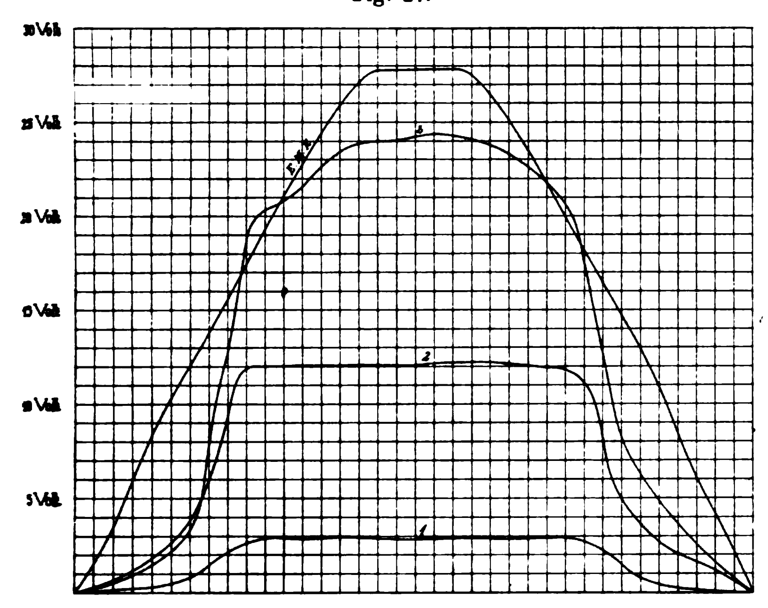
Polschuhe N:2, b-100 m/m

Fig. 26.



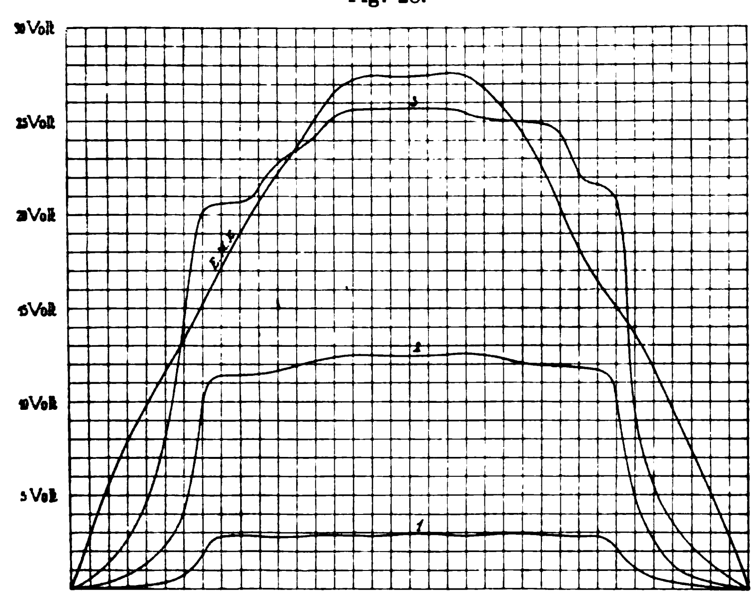
Polschuhe N° 3, b-80–120 m/m

Fig. 27.



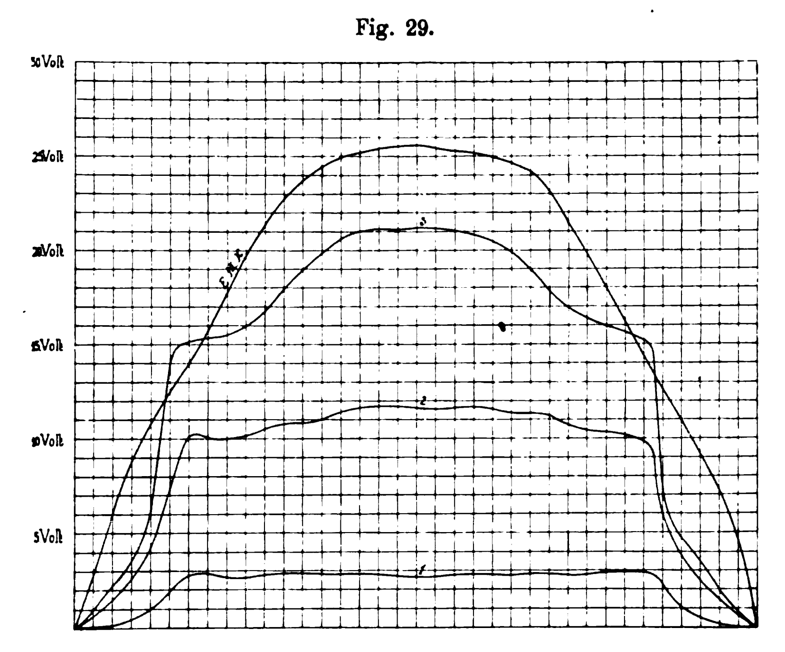
Polschuhe Nº 3a, b - 120 m/m

Fig. 28.



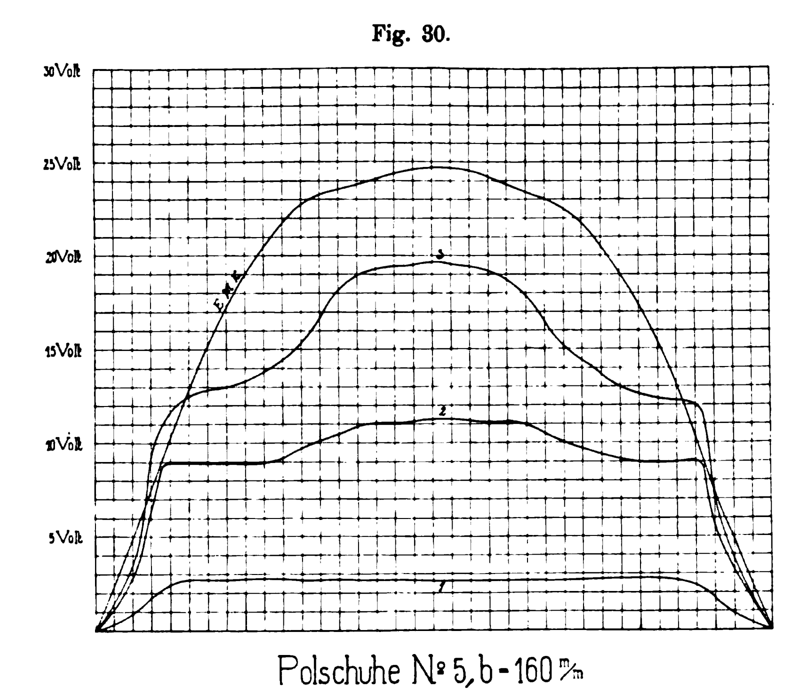
Polschuhe Nº 3b, b - 120 m/m

Fig. 29.



Polschuhe № 4, b = 140 m/m

Fig. 30.

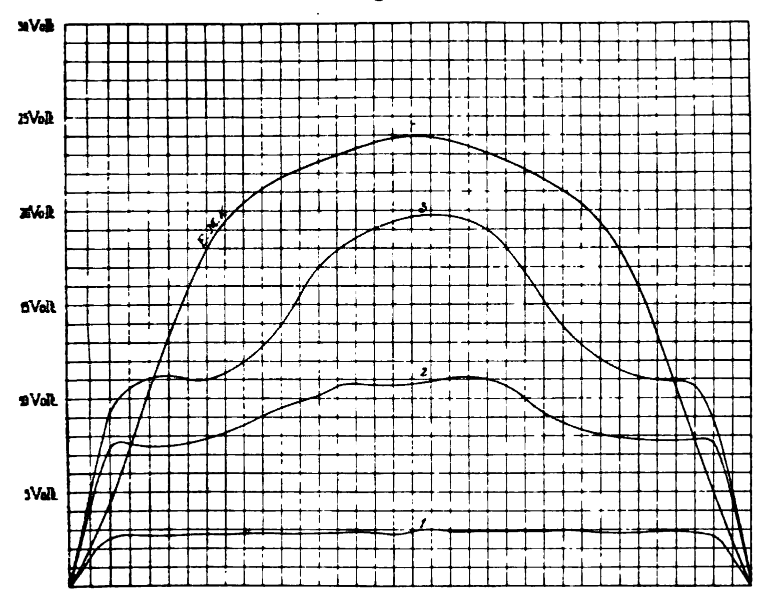


Polschuhe № 5, b = 160 m/m

Aus diesen Versuchen sind α_i, f_B und $\alpha_i \cdot f_B$ für alle Polschuhe bei allen drei Erregungen berechnet, ferner der Formfaktor f_E und der Scheitelfaktor f für die E.M.K.-Kurve bei der mittleren Erregung. Aus den Daten der Maschine kann man mit Annäherung die elektromagnetische Kraft $H_{n,\,max}$ der Erregerspulen unter der Mitte eines Polschuhes zu 30, 130 und resp. 350 in absoluten Einheiten bei den drei verschiedenen Erregungen berechnen; hieraus und aus den Feld-



Fig. 31.



Polschuhe № 6, b = 180 m/m

verteilungskurven findet man dann bei den verschiedenen Kurven das Verhältnis $100 \frac{H_{n,\,max}}{B_\delta}$, welches Verhältnis wir als Mass für die Deformation der Feldkurve angegeben haben. Die Versuche bestätigen unsere Behauptung. Alle Versuchsergebnisse sind in der Tabelle XII zusammengestellt.

Betrachten wir die Formfaktoren der E.M.K.-Kurven, so variieren diese nicht stark und schwanken alle um 1,1 herum, welcher Wert für die Sinuskurve gilt; die kleine Variation in f_E rührt natürlich von der verteilten Wicklung her; aber trotz dieser variiert der Scheitelfaktor doch bedeutend.

Um die für diese Polanordnung gefundenen α_i, f_B und $\alpha_i \cdot f_B$ mit

den berechneten zu vergleichen, zeichnen wir alle graphisch als Funktion von α auf (siehe Fig. 32 und 33). Es muss jedoch bemerkt

Fig. 32.

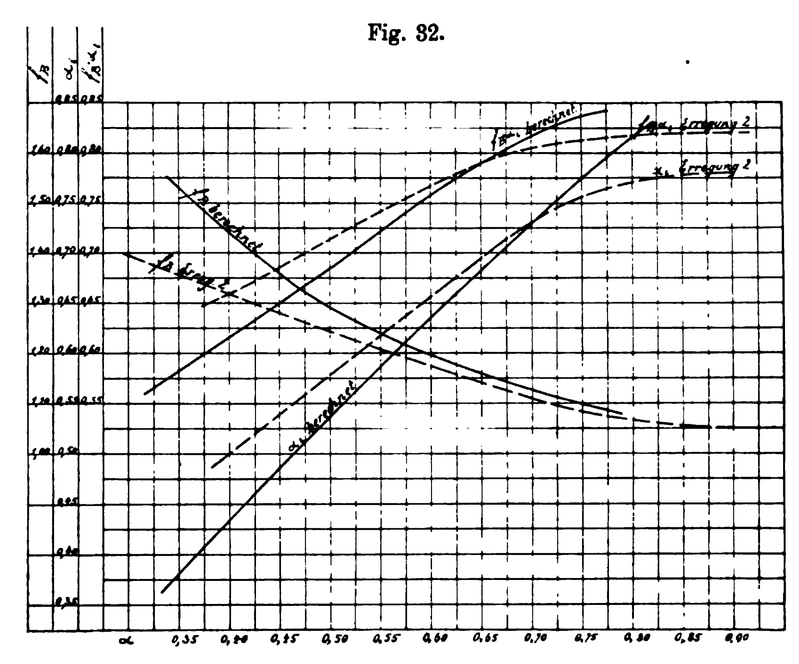
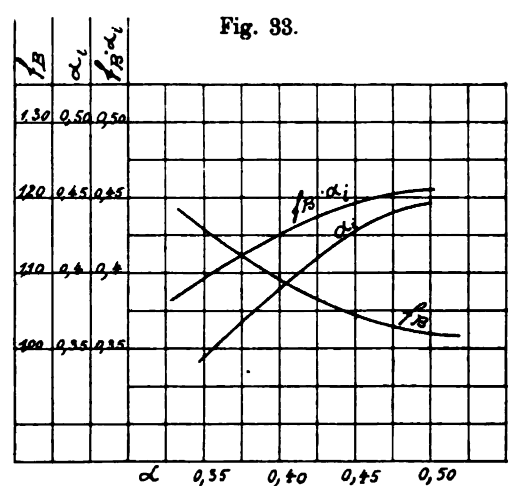


Fig. 33.



werden, dass der Vergleich nicht ganz einwandsfrei ist, weil die Polschuhe des Versuchsobjektes scharfe Polecken besitzen und ein anderes, sogar mit α variables Verhältnis $\frac{\delta}{b}$. — Je höher die Erregung, desto

Tabelle XII.

Polschuhe[1]		Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 3a	Nr. 3b	Nr. 4	Nr. 5	Nr. 6
Polbogen b in mm		80	100	80—120	120	120	140	160	180
$\alpha = \frac{b}{\tau}$		0,4	0,5	0,4—0,6	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9
$\frac{\delta}{b}$		$\frac{1}{10,7}$	$\frac{1}{13,3}$	$\frac{1}{10,7}$ — $\frac{1}{16}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{18,7}$	$\frac{1}{21,3}$	$\frac{1}{24}$
α_i	Erregung 1	0,49	0,59	0,60	0,63	0,66	0,76	0,85	0,92
	„ 2	0,50	0,58	0,61	0,63	0,65	0,73	0,77	0,78
	„ 3	0,51	0,58	0,55	0,57	0,62	0,66	0,68	0,67
f_B	Erregung 1	1,35	1,25	1,21	1,20	1,19	1,12	1,05	1,03
	„ 2	1,32	1,25	1,20	1,18	1,17	1,11	1,06	1,05
	„ 3	1,29	1,22	1,23	1,22	1,18	1,13	1,09	1,08
$f_B . \alpha_i$	Erregung 1	0,66	0,74	0,725	0,755	0,79	0,85	0,89	0,95
	„ 2	0,66	0,73	0,73	0,74	0,76	0,81	0,815	0,82
	„ 3	0,66	0,71	0,68	0,69	0,73	0,74	0,74	0,72
B_δ	Erregung 1	1000	881	880	875	870	825	815	822
	„ 2	4200	3710	3610	3610	3700	3410	3295	3260
	„ 3	8300	7300	7350	7200	7580	7320	7340	7120
$\frac{100\, H_{n\,max}}{B_\delta}$	Erregung 1	3,00	3,40	3,41	3,43	3,44	3,63	3,68	3,66
	„ 2	3,10	3,50	3,60	3,60	3,51	3,81	3,95	3,99
	„ 3	4,20	4,79	4,76	4,85	4,62	5,60	6,00	6,02
E_{eff}	Erregung 1	22	22	22	23	24	25,3	26,5	28
	„ 2	92	93,5	93,5	95,5	97,5	97,5	96,5	93
	„ 3	181	178	174	175	175	163,5	155	148
f_E	Erregung 2	1,20	1,14	1,14	1,13	1,12	1,10	1,10	1,09
f	Erregung 2	1,68	1,52	1,53	1,47	1,40	1,32	1,30	1,29

tiefer liegen die α_i- und $f_B . \alpha_i$-Kurven. Hieraus sieht man, dass die Forderung von grossen Polbogen, um eine grössere E.M.K. zu erreichen, nicht vollständig einwandsfrei ist; da wir aber später noch den Einfluss des Polbogens auf andere Vorgänge in einer Wechselstrommaschine diskutieren werden, gehen wir hier nicht weiter auf diese Frage ein.

[1]) Polschuh Nr. 3 abgeschrägt von 120 auf 80 mm; Polschuh Nr. 3a Ecken mit einem Radius von 8 mm abgerundet; Polschuh Nr. 3b Ecken nicht abgerundet.

Bei einer genauen Vorausbestimmung der Leerlaufcharakteristik muss man nicht allein mit einer Aenderung der magnetischen Widerstände des Eisens, sondern auch mit der Aenderung des magnetischen

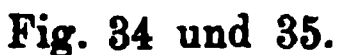


Fig. 34 und 35.

Fig. 34

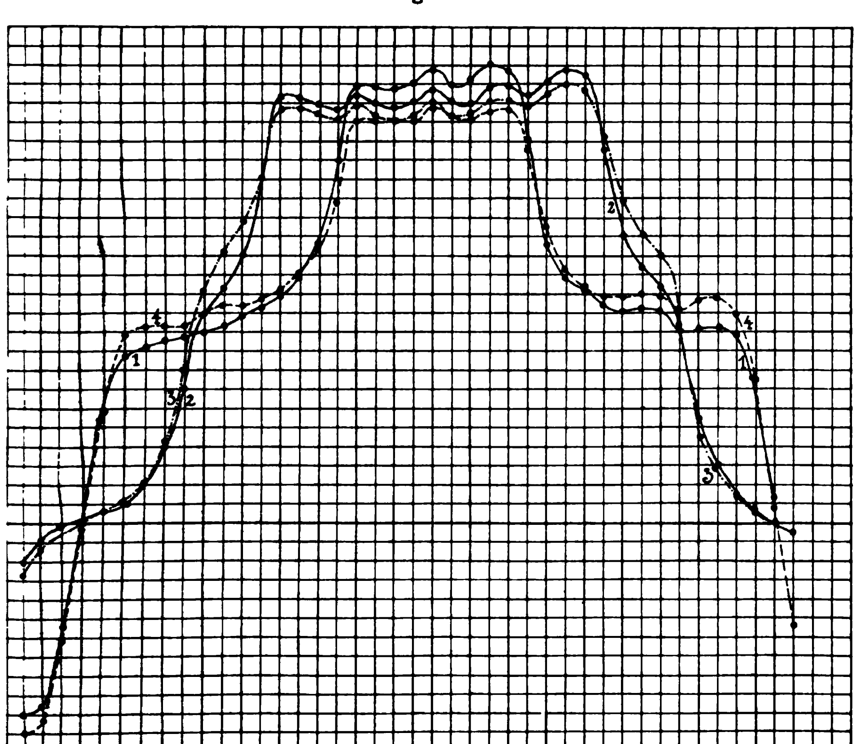
Fig. 35

Widerstandes des Luftzwischenraumes oder vielmehr mit einer Aenderung des Produktes $f_B \cdot \alpha_i$ rechnen. Die Variation dieses Produktes ist rechnerisch nicht einfach zu bestimmen und kann vielleicht nur durch

viele Versuche festgelegt werden. Ebenso ist es nicht immer möglich, die magnetischen Eigenschaften des Eisens genau zu kennen, so dass die Vorausberechnung der Leerlaufcharakteristik nicht so zuverlässig ist, wie man oft wünschen muss.

Um die genaue Methode zur Berechnung der Feldintensitätskurven zu prüfen und um den Einfluss der Nuten zu erkennen, wurde eine Wechselpoleinphasenmaschine von der Gesell-

Fig. 36.



schaft für elektrische Industrie in Karlsruhe, die in Fig. 34 dargestellt ist, untersucht. Sie hat 9 Löcher pro Pol, wovon nur 4 bewickelt sind; man erhält deswegen 4 Arten Spulen, deren 4 Spulenseiten y_1, y_2, y_3 und y_4 alle verschieden sind; y_1 ist die Spulenweite der kürzesten und y_4 die der längsten Spule, und da $y_1 + y_4 = 2\tau$, so werden, wie früher bewiesen, die in diesen 2 Spulen induzierten E.M.Ke. identisch sowohl der Form wie der Grösse nach. Dasselbe ist der Fall für die zwei mittleren Spulen, weil $y_2 + y_3 = 2\tau$. — Es

wurde nun zuerst die Feldintensitätskurve der Maschine berechnet und zwar unter Berücksichtigung der endlichen Länge der Polschuhe und der endlichen Länge der Ankerbohrung. Die so erhaltene Kurve ist die in Fig. 35 aufgetragene Kurve I. Aus dieser wurde nun die E.M.K.-Kurve der Spulen 1 und 4 und die der Spulen 2 und 3 durch Superposition zweier Feldintensitätskurven, die um $y_1 = 2\tau - y_4$ resp. um $y_2 = 2\tau - y_3$ gegeneinander verschoben waren, konstruiert. In die linke Hälfte der Fig. 35 ist die erste und in die rechte Hälfte die zweite E.M.K.-Kurve eingetragen, als II und III. — Alsdann

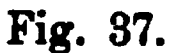
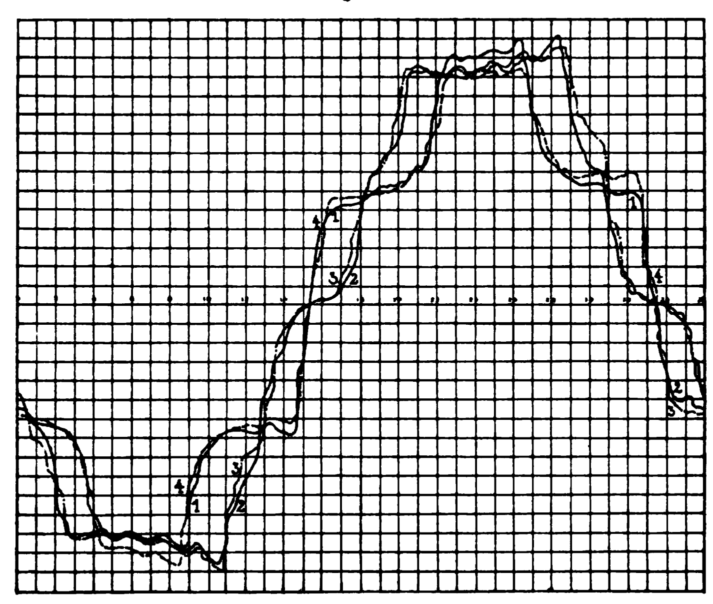


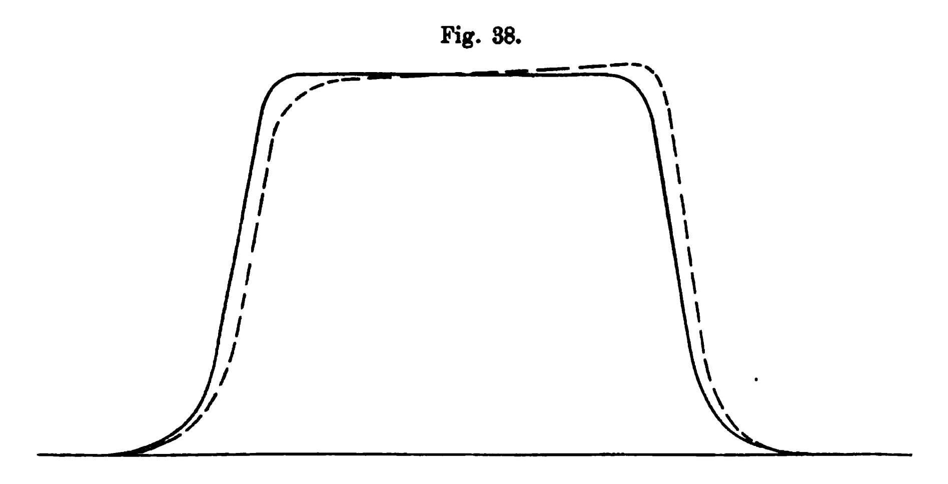
Fig. 37.



wurden die E.M.K.-Kurven jeder Spule erstens ballistisch (Fig. 36) und zweitens mit dem Francke'schen Apparat (Fig. 37) aufgenommen. Diese experimentell gefundenen Kurven zeigen gewisse Unsymmetrien; aber es ist deutlich zu sehen, dass diese in erster Linie von einer ungenauen Centrierung des rotierenden Feldsystemes herrühren, welche ungleiche Induktionen unter den verschiedenen Polschuhen hervorruft, und diese bewirkt, wie aus der graphischen Konstruktion der E.M.K.-Kurve hervorgeht, eine Verschiedenheit der maximalen Ordinaten des positiven und negativen Teiles dieser Kurve. — Ferner kommen auch Unsymmetrien hinein wegen des remanenten Magnetismus, welcher bewirkt, dass der aufsteigende Ast der E.M.K.-Kurve tiefer und der

absteigende höher zu liegen kommt als in der theoretisch berechneten Kurve (siehe Fig. 38). Den Einfluss dieser Unsymmetrien auf den Vergleich der experimentell gefundenen und der berechneten Kurven kann man zum Teil eliminieren, indem man die Mittelwerte aus den zwei Seiten beider Kurven (die für Kurve 1 und 4 und die für Kurve 2 und 3) nimmt. Aus Kurven, die in der gewöhnlichen ballistischen Weise aufgenommen wurden, sind auf diese Weise die Kurven II' und III' gefunden. Aus diesen und den berechneten Kurven II und III bildet man die Differenzkurven II'' und III'', welche Kurven, wenn die Methode zur Berechnung der Feldintensitätskurven ganz exakt wäre, nur den Einfluss der Nuten auf die

Fig. 38.



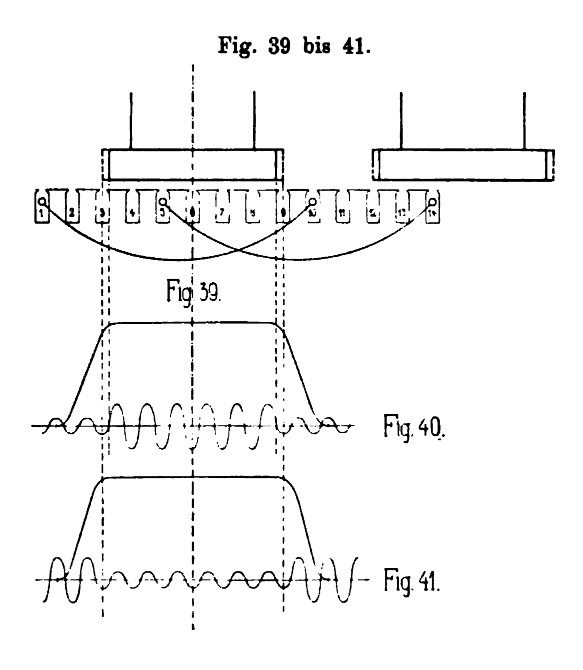
Variation des Kraftflusses Z_x und damit auf die E.M.K.-Kurve darstellen würden.

Betrachtet man den Einfluss der Nuten auf die E.M.K.-Kurve, so kann man bei mehrnutigen Ankern gewöhnlich 2 Fälle unterscheiden, die beide in Fig. 39 dargestellt sind.

I. Fall (Polschuhe voll ausgezogen). Bewegt die Armatur sich relativ zum Polschuhe, so wird der totale Kraftfluss Z_{max} in seiner Grösse wenig schwanken, weil in dem Momente, in welchem eine Nut unter der einen Ecke des Polschuhes eintritt, ein Zahn unter der anderen Ecke austritt u. s. w., so dass der magnetische Widerstand des Luftspaltes sich nur wenig ändert. Dagegen oscilliert der Kraftfluss unter dem Polschuhe hin und her, und zwar einmal für jeden Zahn, wenn dieser unter einer Ecke eintritt. Betrachten wir eine Spule, die in den Nuten 1 und 10 untergebracht ist, so ist der diese

Spule durchsetzende Kraftfluss fast unabhängig von der Lage der Nuten, während eine Spule, die in den Nuten 5 und 14 liegt, von einem Kraftfluss durchsetzt wird, der fast 0 ist, und wegen des Hin- und Heroscillierens des totalen Kraftflusses stets schwankt. Man erhält deswegen für diese letzte Lage einer Spule eine induzierte E.M.K., herrührend von den Nuten, die eine Periodenzahl $2\gamma c$ besitzt, wenn c = Periodenzahl des Wechselstromes und der Anker γ Nuten pro Pol besitzt. Aus dem Gesagten folgt das in Fig. 40 gegebene Bild

Fig. 39 bis 41.



von den in einer Spule induzierten E.M.K.en, welche sich superponieren und die resultierende E.M.K.-Kurve ergeben.

Im Falle II (Polschuh punktiert, Fig. 39) liegen unter den Ecken desselben Polschuhes entweder 2 Nuten oder 2 Zacken, so dass man zwar eine kleine Oscillation des Feldes hin und her erhält, aber auch eine bedeutende Schwankung der Grösse des totalen Flusses (hier variiert nämlich die Summe der Längen der Zahnkronen unter dem Polschuhe), und man sieht leicht ein, dass man folgendes Bild der E.M.K.-Kurven erhalten kann (Fig. 41).

Wie gross die Amplituden dieser höheren Harmonischen sind, ist schwer voraus zu sagen; denn man müsste zuerst den Einfluss der Nuten auf die Kraftflussverteilung zwischen Pol und Armatur be-

stimmen, um die Aenderung des Flusses mit der Aenderung der Stellung der Armatur voraus zu bestimmen.

Wendet man diese Betrachtung auf die hier behandelte Maschine der Gesellschaft für elektrische Industrie an, so sieht man, dass hier der Fall I hauptsächlich in Betracht kommen kann; nur treten die von den Nuten herrührenden Unterschiede zwischen den zwei Teilen der E.M.K.-Kurve hier nicht so scharf auf wie in Fig. 40, weil die Polschuhecken abgerundet sind und $y \gtrless \tau$.

Wenn man nun in Betracht zieht, dass die Konstruktion der Feldintensitätskurven hier nur angenähert richtig ist, so darf man behaupten, dass die Kurven II″ und III″ so wenig von dem Gewünschten abweichen, dass die vorgeführten Berechnungen und Erklärungen als richtig und brauchbar angesehen werden können.

Zackenarmaturen: Will man die E.M.K.-Kurve solcher Armaturen möglichst exakt behandeln, so thut man am besten, zuerst die Feldintensitätskurve derselben Polanordnung für einen glatten Anker aufzuzeichnen und dann mit Hilfe von dieser die Z_x-Kurve als Funktion der Zeit aufzuzeichnen, indem man irgend eine Annahme über die Grösse des Kraftflusses, der in die Nuten eintritt, macht, der ja auch von der Permeabilität μ_z der Zähne abhängt. Aus der Z_x-Kurve konstruiert man sich dann die Kurve für

$$e_x = \left(- \frac{d Z_x}{d t}\right) w.$$

Die halbgeschlossenen und offenen Nuten haben noch den weiteren Einfluss, den magnetischen Widerstand des Luftzwischenraumes zu vergrössern, welche Wirkung die Form der E.M.K.-Kurve ein wenig beeinflussen kann, entsprechend einer Vergrösserung des Luftzwischenraumes.

Unter Umständen können die E.M.K.-Kurven etwas mehr abgerundet werden als die berechneten, und zwar wegen der Sättigung der Zähne, die erstens wie eine Vergrösserung des Luftspaltes wirkt, und zweitens den Kraftfluss zwingt, zum Teil auch durch die Nuten zu verlaufen.

Der remanente Magnetismus bewirkt, wie wir schon gesehen haben, dass der aufsteigende Ast der Feldintensitätskurven niedriger und der abfallende höher zu liegen kommt als der berechnete. Der Einfluss desselben beschränkt sich bei den Gleichpoltypen aber nicht darauf und wirkt dadurch schädlich, dass das Feld

zwischen den Polhörnern viel stärker stehen bleibt als berechnet; die Folge davon ist, dass Z_{max} kleiner ausfällt, oder was dasselbe bedeutet, man wird finden, dass die in den Tabellen angegebenen α_i zu hoch sind. Die Form der E.M.K.-Kurve wird aber nicht viel verändert, und man darf wohl die in den Tabellen angegebenen Werte von E_1^p, E_3^p u. s. w. benutzen.

VIII. Kapitel.

Theorie der Armaturreaktion.

Bis jetzt haben wir die Felder und die physikalischen Vorgänge eines Wechselstromgenerators bei stromloser Armatur untersucht. Wir wollen nun voraussetzen, die Maschine sei belastet, so dass ein Wechselstrom die Armaturwicklung durchfliesst. Dieser Strom erzeugt wie jeder andere Strom ein magnetisches Feld, das in diesem Falle ein Wechselfeld ist. Dieses Wechselfeld wirkt auf die Armaturwicklung induzierend zurück, ferner induziert es Ströme im Erregerstromkreise und Wirbelströme in den massiven Metallteilen der Maschine. Alle diese Wirkungen kann man mit dem Namen „Armaturreaktion" bezeichnen; während die vom Armaturfelde auf die Armaturwicklung ausgeübte induzierende Wirkung nichts anderes ist als Selbstinduktion.

Die Armaturreaktion und der Ohmsche Widerstand der Armaturwicklung bewirkt, dass die Spannung an den Klemmen des Generators bei Belastung niedriger wird als bei Leerlauf, wenn die Erregung unverändert gelassen wird. Der Abfall der Klemmenspannung dividiert durch die Spannung bei Leerlauf, multipliziert mit 100, heisst man den prozentualen Spannungsabfall.

Umgekehrt kann man den Vorgang betrachten, der eintritt wenn die Belastung der Maschine bei normaler Klemmenspannung abgeschaltet wird und die Armatur stromlos wird. Lässt man auch in diesem Falle die Erregung unverändert, so steigt die Klemmenspannung, und die Spannungserhöhung dividiert durch die normale Spannung, multipliziert mit 100, heisst man die prozentuale Spannungserhöhung.

Lässt man eine bekannte E.M.K. (e) auf irgend eine beliebig geschlossene Leitung wirken, so erzeugt diese in dem Kreise einen Strom i, dessen Stärke von der Art des Kreises abhängig ist. Die Eigenschaften des Kreises können im allgemeinen durch einen effektiven Widerstand r und seine effektive Reaktanz x (bezogen auf die Grund-

welle) ausgedrückt werden, seien diese nun herrührend von Ohmschen Widerständen, Selbstinduktion oder gegenseitiger Induktion zwischen dem betrachteten Stromkreis und benachbarten metallischen Leitern oder herrührend von Kapazitäten.

Wie und wo man in die Leitung die bekannte E.M.K. einführt oder erzeugt, hat keinen Einfluss auf die Lösung der Aufgabe, solange e unabhängig von dem effektiven Widerstand und der effektiven Reaktanz der Leitung ist, und dies ist in der That der Fall bei der in einem Wechselstromgenerator bei konstanter Erregung und konstanter Tourenzahl induzierten E.M.K. (e). — Umgekehrt sind aber r und x der Wicklung eines Wechselstromgenerators nicht unabhängig von der Grösse der induzierten E.M.K. (e) oder richtiger gesagt von der Erregerstromstärke i_e; denn diese ändert die magnetische Permeabilität der Eisenteile des Generators. Dieser Einfluss auf r und x muss dann genügend berücksichtigt werden.

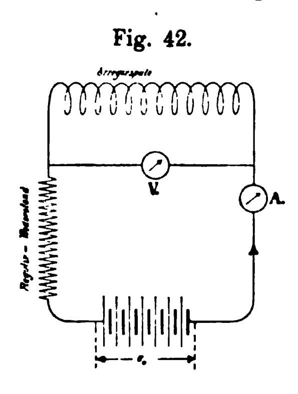
Um den Spannungsabfall oder die Spannungserhöhung eines Generators zu bestimmen, müsste man eigentlich die Differentialgleichung des Stromkreises auflösen; dies hat aber keine praktische Bedeutung; denn erstens ist e keine Sinusfunktion und zweitens sind sowohl der effektive Widerstand r_a wie der Selbstinduktionskoëffizient L_a der Armaturwicklung pro Phase keine konstanten Grössen, so dass die Lösung der Differentialgleichung von ziemlich komplizierter Natur sein würde.

Dr. Behn-Eschenburg brachte in E.T.Z. 1895 die Differentialgleichungen eines Wechselstromgenerators. Die erste seiner Gleichungen bezog sich auf den Hauptstromkreis, die zweite auf den Erregerstromkreis und die übrigen auf die Wirbelstromkreise; aber nur die erste hat eigentlich Bedeutung, weil die anderen nur zur Darstellung der Zustände in den benachbarten Leitern dienen können. Diese Zustände haben aber erstens weniger Interesse und zweitens sind die Induktionskoëffizienten dieser Stromkreise unbestimmbar. Aus diesen Gründen sehen wir davon ab, näher auf diese letzten Differentialgleichungen einzugehen, was Dr. Behn-Eschenburg in Wirklichkeit auch thut. Er beweist zwar aus den zwei ersten Differentialgleichungen, dass die Spannung an den Klemmen der Erregerspulen sich senkt, wenn man eine Einphasenmaschine belastet. Das geht auch aus dem Folgenden hervor:

Da die Armatur sich relativ zum Erregerfelde bewegt und das Armaturfeld mit derselben Periodenzahl wechselt wie die relative Bewegung zwischen Armatur und Feldpolen, so wird das Wechselfeld

auf das Erregerfeld wie ein pulsierendes Feld zurückwirken. Derjenige Teil des pulsierenden Armaturkraftflusses, der mit den Erregerwindungen verschlungen ist, induziert in diesen einen Wechselstrom i', der sich über den konstanten Gleichstrom i_e superponiert (siehe Fig. 42). Dadurch wird die effektive Stromstärke dieses resultierenden Wellenstromes grösser als i_e und dadurch wächst der Spannungsabfall in dem Teile der Erregerleitung, der ausserhalb der Maschine liegt, und die Spannung an den Klemmen der Erregerspulen fällt und zwar um so mehr, je grösser der Widerstand des äusseren Teiles ist. Aber dessen ungeachtet bleibt doch die Erregerstromstärke i_e, die von der konstanten Gleichstromspannung e_e erzeugt wird, dieselbe und gleich der mittleren Stromstärke des Wellenstromes; also bleibt auch die vom Erregerstrome i_e im Anker induzierte E.M.K. (e) bei konstanter Tourenzahl unverändert. Man kann nun fragen, wie wird die Wirkung berücksichtigt, die dadurch entsteht, dass der Strom in den Erregerspulen bei Belastung pulsierend ist und deswegen Wechselströme derselben, dreifacher und höherer Periodenzahl in der Armatur induziert. Es geschieht einfach dadurch, dass die Reaktanz x oder der Selbstinduktionskoëffizient L als pulsierend betrachtet wird.

Fig. 42.



Man nimmt gewöhnlich an, dass alle Ströme und Spannungen Sinusform haben, indem man die wirklichen durch äquivalente von demselben Effektivwert ersetzt. Die Effektivwerte von Strömen und Spannungen trägt man dann in Diagrammen als Vektoren auf und addiert diese geometrisch, was nicht vollständig richtig ist. Ferner heisst man den cos des Winkels zwischen den Vektoren des effektiven Stromes und der effektiven Spannung eines Stromkreises den Leistungsfaktor. Kennt man nun die effektive Klemmenspannung eines Generators bei Leerlauf und belastet denselben mit einem beliebigen effektiven Strom, so wird die Spannung zwischen den Klemmen sinken, und zwar kann man angenähert diese bestimmen, indem man in einem Vektordiagramm die E.M.K. $J \cdot x_a$ der Selbstinduktion des Generators senkrecht zum Stromvektor und den Spannungsabfall Jr_a in der Richtung des Stromvektors abträgt, wo r_a der effektive Widerstand und x_a die effektive Reaktanz der Armaturwicklung bedeutet. In Fig. 43 ist diese Konstruktion gezeigt. Enthält der äussere Stromkreis Kapazität, so kann dieses Diagramm bedeutend fehlerhafte Werte ergeben. Ebenso

werden wir sehen, dass die Kurzschlussdiagramme oft fehlerhaft sein können. Aber ausser den Ungenauigkeiten der geometrischen Addition von Effektivwerten der E.M.Ke. beliebiger Kurvenform macht die Vorausbestimmung von x_a und r_a Schwierigkeiten. Diese Grössen können nicht, wie gewöhnlich verfahren wird, aus dem Kurzschlussdiagramm direkt bestimmt werden, obwohl die vom Felde induzierte

Fig. 43.

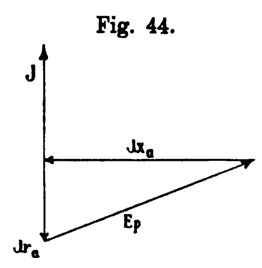


Fig. 44.

E.M.K. (e) gleich dem Spannungsabfall in der Armaturwicklung ist, wie Fig. 44 angibt, weil sie sich mit der Belastung ändern.

Wenn wir alle Einflüsse auf den Spannungsabfall in einem Generator zusammenstellen, so ergeben folgende einen Beitrag zu dem effektiven Widerstande:

1. Ohmscher Widerstand r_w,
2. Wirbelströme in den Polschuhen und Wechselströme im Erregerkupfer,
3. Schwankung der Reaktanz (siehe Ch. P. Steinmetz, Alternating Current Phenomena).

Die selbstinduzierende Wirkung geschieht durch

1. den quermagnetisierenden Kraftfluss, der sich nur durch die Polschuhe um die Armaturwicklung herumschliesst,
2. den entmagnetisierenden Kraftfluss, der sich durch das Joch schliesst, und
3. den Streufluss um die Nuten und durch die Luft.

Auf diese Kraftflüsse wirken aber die Wirbelströme, die Wechselströme in den Erregerspulen und die Schwankung des magnetischen Widerstandes dämpfend zurück.

Von den effektiven Widerständen kennt man nur den Ohmschen und kann durch Kurzschlussversuche eventuell den totalen effektiven Widerstand r_a bestimmen.

Bei dickeren Kupferstäben ist der Widerstand nicht wie gewöhnlich zu rechnen, weil die Selbstinduktion des Stromes denselben nach

der Oberfläche hin treibt. Ist der Leiter von kreisförmigem Querschnitt und in der Luft gelagert, so findet man

$$r_a = r_g (1 + 7{,}5\, d^4\, c^2\, 10^{-7}),$$

wo r_g gleich Widerstand des Leiters für Gleichstrom und d gleich Durchmesser des Drahtes in Centimeter.

Sind die Leiter in Eisen eingebettet, so tritt eine grössere Selbstinduktion auf, und die Linien verlaufen in dem stromführenden Leiter ganz anders als bei der Ableitung der obigen Formel angenommen wurde. In einem Leiter, der in einer Nut gelagert ist, bekommt man in dem Teil des Leiters, der am tiefsten in der Nut liegt, die kleinste Stromdichte. Diese sogenannte Oberflächenwirkung (skin effect) bewirkt, dass der Selbstinduktionskoëffizient des Leiters sinkt.

Wir haben schon früher die vom Magnetfelde induzierte E.M.K. berechnet und gefunden

$$E = 4 \,.\, k \,.\, c\, w\, Z_{max}\, 10^{-8}.$$

Aehnlich erhält man für die vom Armaturfelde induzierte E.M.K.

$$E_s = J \,.\, x_s = 4\, k_s\, c\, w\, Z_s\, 10^{-8}.$$

Wie gross sind nun aber k_s und Z_s?

Bei den Mehrphasengeneratoren, wo, wie bekannt, das rückwirkende Armaturfeld ein schwach pulsierendes Drehfeld ist, kann man von Fall zu Fall k_s bestimmen; aber da die Form des Armaturfeldes von vielen Dingen abhängt und besonders von der Phasenverschiebung φ des Stromes, wodurch sich auch die Form der E_s-Kurve mit der Phasenverschiebung ändert, so wird eine rechnerische Verfolgung von k_s schwierig und ziemlich wertlos.

Bedenkt man nun, dass

1. k_s ebenso wie k kein stark variierender Faktor ist,
2. dass die Form des Armaturfeldes um so spitzer ist, je schmäler die Polschuhe sind, was auch für das Erregerfeld gilt, so dass k_s und k in gleichem Sinne von α beeinflusst werden, und
3. dass die Verteilung der Wicklung einen ausgleichenden Einfluss auf den Faktor k_s wie früher auf k hat (vergl. Tabelle I bis XI),

so darf man, ohne einen grossen Fehler zu begehen,

$$k_s = k$$

setzen, was für die praktische Verwendung der Leerlaufcharakteristik zur Bestimmung von E_s sehr bequem ist.

Ferner ist der Fehler, den man hiedurch bei der Vorausbestimmung des Spannungsabfalles begeht, nicht gross, weil die Feldintensitätskurve nicht wesentlich von den Armaturampèrewindungen deformiert wird.

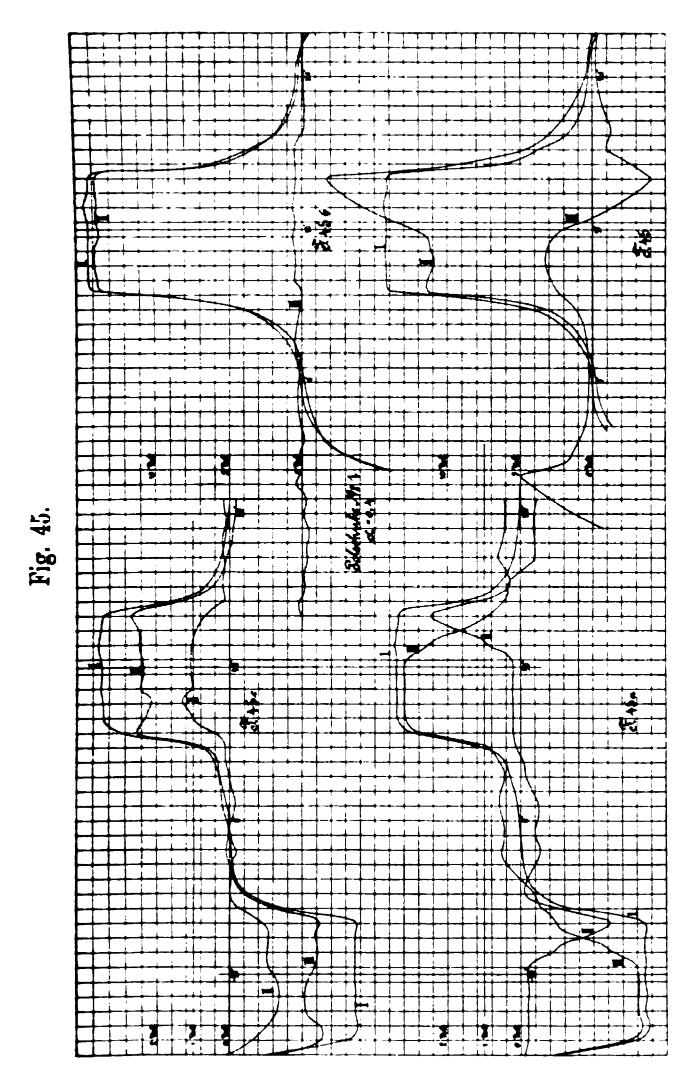


Fig. 45.

Der Spannungsabfall wird deswegen hauptsächlich auf einer richtigen Vorausberechnung von Z_s beruhen.

Bei Einphasengeneratoren ist die Bestimmung der Kurvenform von E_s schwieriger; denn hier hat man kein Drehfeld, sondern ein Wechselfeld.

$$e_s = -\frac{\delta(L_a\, i)}{\delta t}$$

sagt sehr wenig; dagegen zeigen die Versuche mit der früher erwähnten Schuckertschen Maschine, dass die vom Armaturfelde in

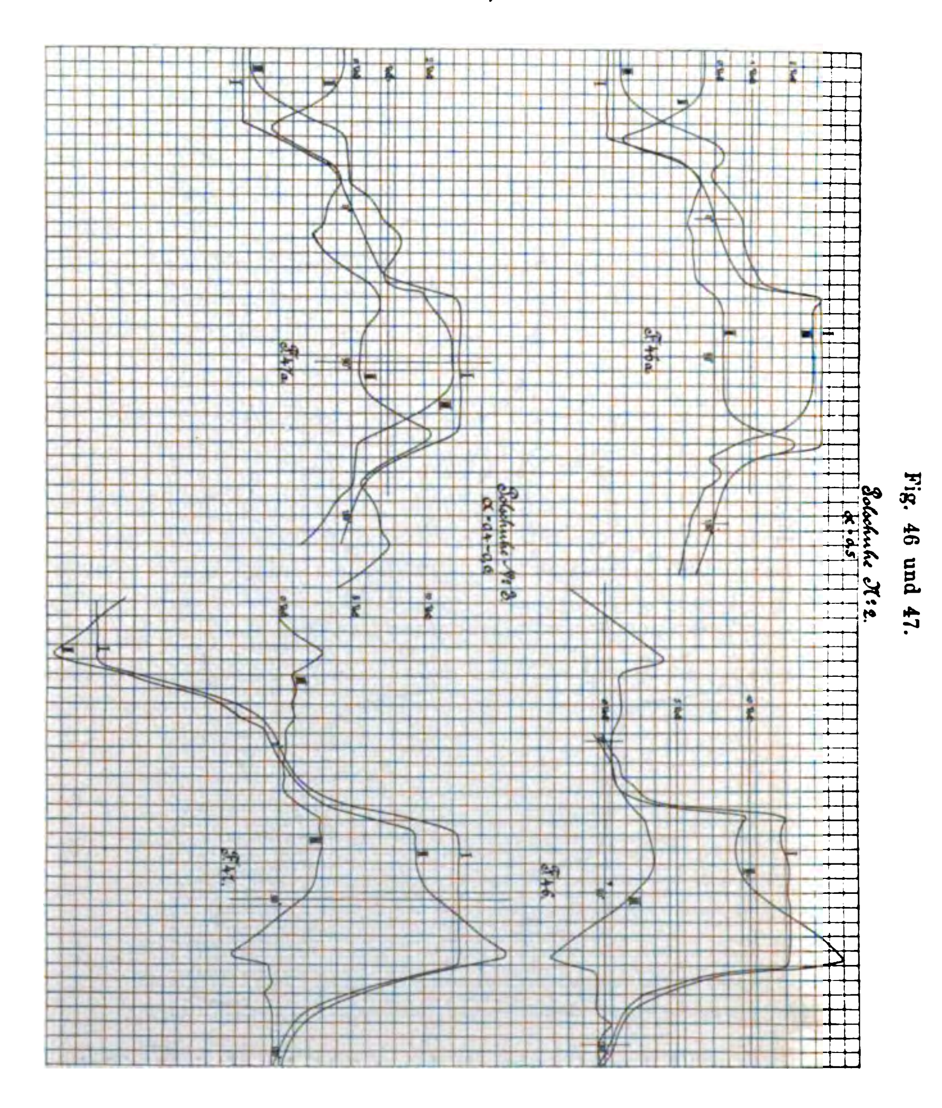


Fig. 46 und 47.

einer Spule (über der Armaturspule gelegt) induzierte E.M.K. ebensogut oder eher von einem Drehfelde induziert werden könnte als von dem Wechselfelde des Armaturstromes.

Bevor wir daher weitergehen, wollen wir die **Versuche mit der Schuckertschen Maschine** eingehender besprechen.

Es wurde bei normaler Erregung und Leerlauf die Feldintensitätskurve mittels einer Probespule aufgenommen, deren Seiten über der

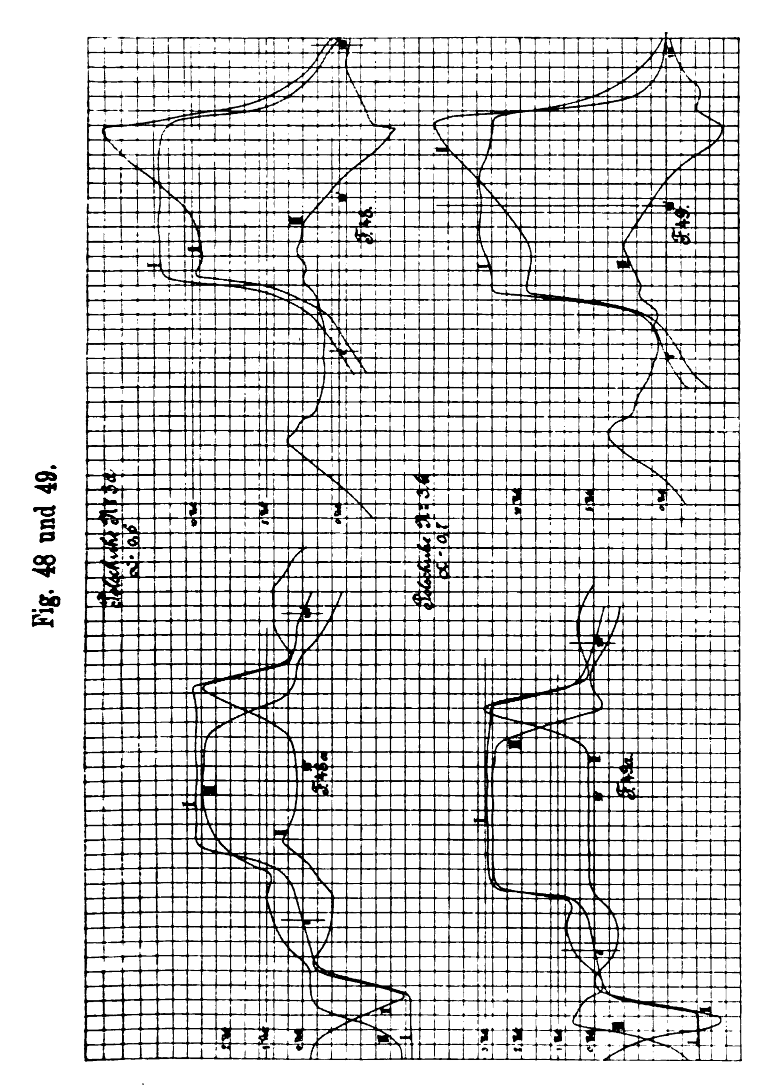


Fig. 48 und 49.

Mitte der Armaturspulenseiten lagen. Alsdann wurde, ohne die Erregung zu ändern, die Maschine mit einem reinen Ohmschen Widerstand belastet, bis die Stromstärke auf 40 Ampère, d. h. beinahe auf die doppelte normale Stromstärke anstieg, und bei diesen Verhält-

nissen wurde die Feldkurve wieder aufgenommen. Subtrahiert man nun diese zwei Kurven voneinander, so erhält man das Armaturfeld. Dieser Versuch wurde für dieselben Polschuhe, wie sie früher verwendet wurden, durchgeführt, und die gefundenen Kurven sind in den

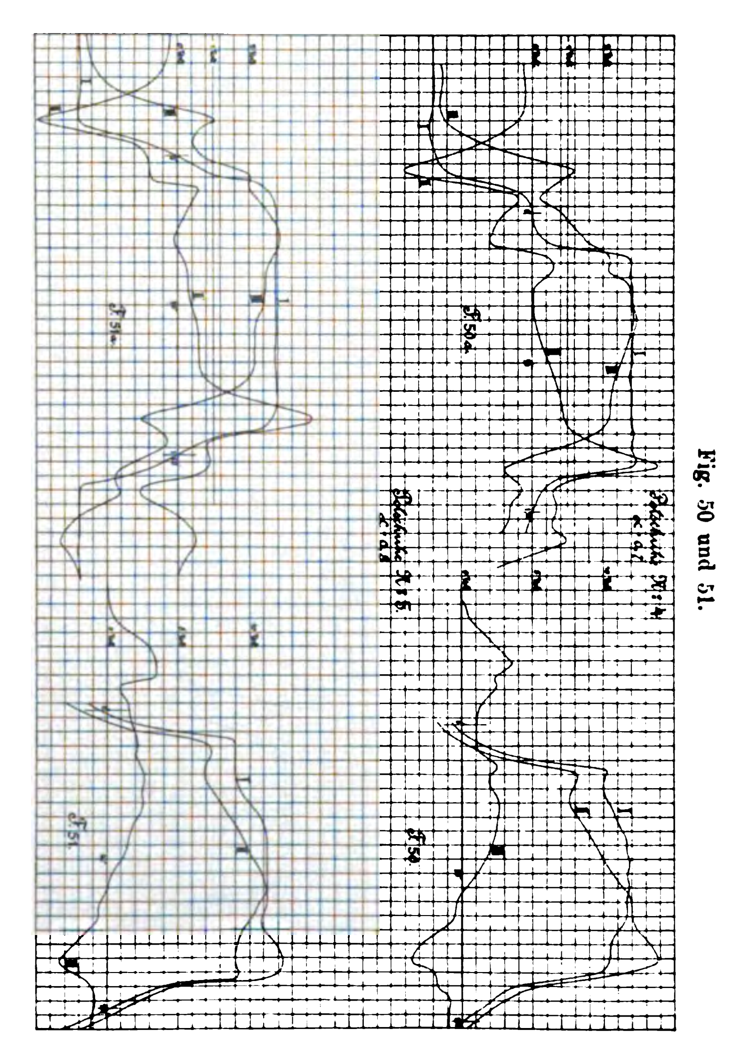


Fig. 50 und 51.

Fig. 45 bis 52 eingetragen. Die Kurve I ist die Feldintensitätskurve bei Leerlauf, die Kurve II die bei Belastung und die Kurve III die des Armaturfeldes.

Derselbe Versuch wurde nun bei einer niedrigen Erregung wiederholt und zwar bei einer solchen, die bei Kurzschluss 40 Ampère

Armaturstrom liefert. Die Fig. 45a bis 52a geben die bei diesen Verhältnissen aufgenommenen Kurven. Die Kurve I ist wieder die Feldintensitätskurve bei Leerlauf, die Kurve II ist die bei Kurzschluss

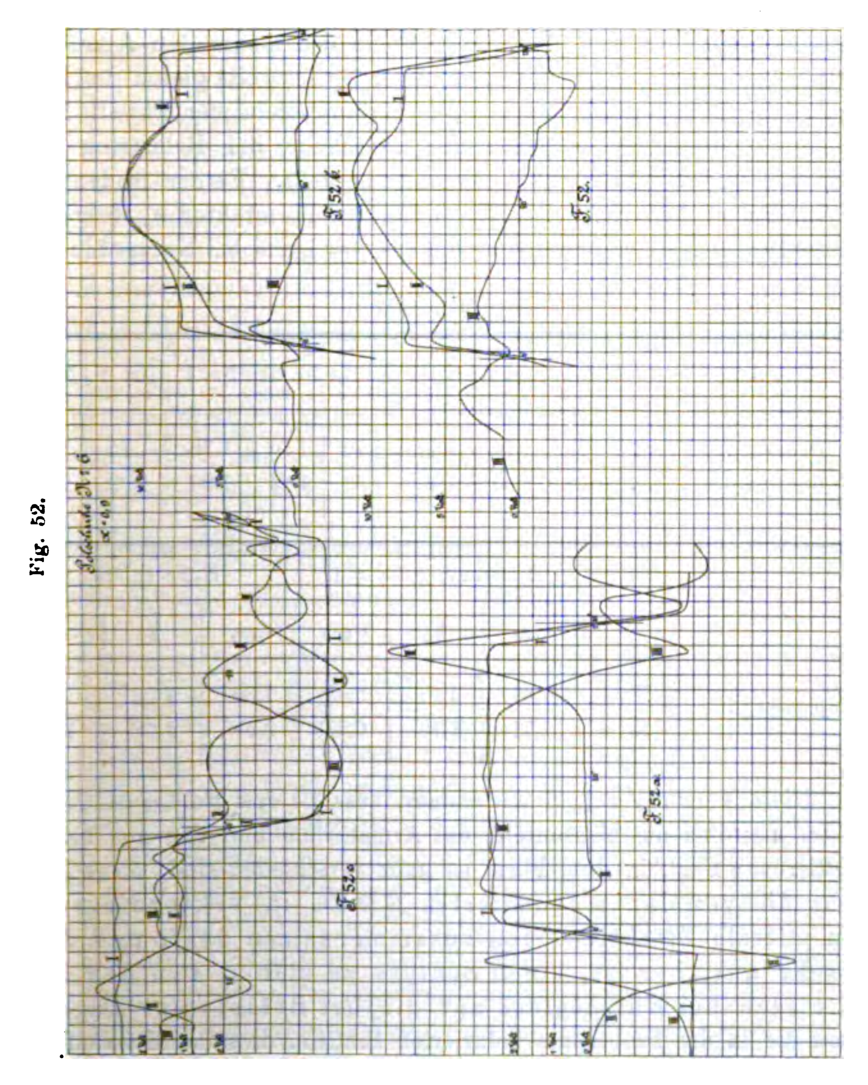


Fig. 52.

(J = 40 Ampère) und die Differenzkurve III gibt uns somit das Armaturfeld bei Kurzschluss.

Nun wurde diese Probespule heruntergenommen und eine zweite aufgelegt, deren Spulenseiten in der Mitte zwischen den Hauptspulenseiten angebracht waren. Mit dieser wurden die zwei obigen

Versuche wiederholt, aber nur für die Polschuhe Nr. 1 und Nr. 6, deren Resultate in den Fig. 45 b, 52 b, 45 c und 52 c dargestellt sind.

Für alle Kurven sind die Mittelwerte der in der Probespule induzierten E.M.Ke. ermittelt. Diese sind den entsprechenden maximalen Kraftflüssen proportional, d. h. proportional den maximalen Armaturkraftflüssen, die mit einer Windung, deren Spulenweite gleich der Polteilung ist, jemals verschlungen sind. In der untenstehenden Tabelle XIII sind diese Mittelwerte e_{mitt} für alle Polschuhe bei Belastung mit $\cos\varphi = 1$ und bei Kurzschluss zusammengestellt. Ferner finden wir bei den Polschuhen Nr. 1 und Nr. 6 für den Formfaktor k_s folgende Werte (Tabelle XIII) bei Belastung mit $\cos\varphi = 1$ und bei Kurzschluss[1]).

Tabelle XIII.

	Polschuhe	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 3a	Nr. 3b	Nr. 4	Nr. 5	Nr. 6
e_{mitt}	Belastung, $\cos\varphi = 1$	1,64	1,76	1,45	1,70	1,76	1,78	1,75	1,71
	Kurzschluss	1,39	1,55	1,45	1,56	1,69	1,87	1,92	2,09

		Belastung, $\cos\varphi = 1$			Kurzschluss		
		e_{mitt}	k_s	e'_{mitt}	e_{mitt}	k_s	e'_{mitt}
Polschuhe	Nr. 1	1,64	1,18	0,33	1,39	1,28	1,24
	Nr. 6	1,71	1,10	0,975	2,09	1,08	1,0

Diese Versuche zeigen uns erstens, dass die drei Felder bei Kurzschluss, nämlich das Magnetfeld, das Armaturfeld und das aus beiden resultierende Feld, in ihrer Form so ganz verschieden sind, **dass man nicht die von ihnen induzierten E.M.Ke. in Vektordiagrammen mittels Effektivwerten zusammensetzen darf, und dass es sehr unsicher ist, einen Schluss zu ziehen von den Verhältnissen bei Kurzschluss auf die bei Belastung.** Dagegen haben die in der Probespule induzierten E.M.Ke. dieselbe Kurvenform wie die von einem Drehfeld induzierten. Bei Belastung mit $\cos\varphi = 1$ ist die E.M.K.-Kurve des Armaturfeldes in der Mitte eingesenkt, ent-

[1]) Die Mittelwerte e'_{mitt} beziehen sich auf die bei 40 Ampère induktionsfreier Belastung vom Armaturfelde induzierte E.M.K. (Kurve III, Fig. 45 b und Fig. 52 b) und auf die bei 40 Ampère Kurzschlussstrom vom Armaturfelde induzierte E.M.K. (Kurve III, Fig. 45 c und Fig. 52 c).

sprechend den Lücken zwischen den Polschuhen; bei Kurzschluss ist die Einsenkung verschoben wegen der Phasenverschiebung φ, die hier nicht gleich 90 ° ist, sondern ca. 60 ° ausmacht (siehe Fig. 45a bis 52a).

Die oben angegebenen Werte von k_s deuten darauf hin, dass man auch hier k proportional k_s setzen darf. Man könnte sich nun denken, dass das Wechselfeld durch zwei Drehfelder ersetzt wird, die in entgegengesetzter Richtung rotieren und deren Amplitude je gleich der halben Amplitude des Wechselfeldes ist; da die Armatur sich relativ zum Felde mit gleicher Geschwindigkeit bewegt wie diese zwei Drehfelder, so steht das eine Drehfeld dem Erregerfelde gegenüber still, während das andere dem Erregerfelde gegenüber mit zweifacher Geschwindigkeit rotiert und daher vielleicht durch die Wirbelströme in den Polschuhen vernichtet wird. Dies ist bei der Schuckertschen Maschine jedoch nicht der Fall; denn dann müsste die vom Armaturfelde in einer Probespule, die in der Mitte zwischen der Hauptspule liegt, induzierte E.M.K. annähernd die Hälfte von derjenigen E.M.K. sein, die induziert wird, wenn die Probespule über die Hauptspule zu liegen kommt. Dies ist nur bei den ganz breiten Polschuhen der Fall, während man bei den kleinen Polschuhen nicht wohl von einem Drehfelde reden kann. Wir können also jetzt für alle Maschinen, ein- oder mehrphasige, schreiben

$$E_s = 4\,k\,c\,w\,Z_s\,10^{-8},$$

wo Z_s der maximale Armaturkraftfluss ist, der mit einer Windung, deren Spulenweite gleich der Polteilung ist, jemals verschlungen wird.

Um Z_s rechnerisch vorauszubestimmen, muss man daran denken, dass ein Teil des Kraftflusses durch das Joch geht, während ein Teil sich durch die Polschuhe allein schliesst. Diese beiden Flüsse haben einen verschiedenen magnetischen Widerstand. Ausserdem hat man noch einen kleinen Kraftfluss um die Nuten herum. Ferner sollte man auch den Einfluss der Deformation der Feldintensitätskurve auf die maximale Stromstärke berücksichtigen; denn letztere beeinflusst wieder Z_s. In einer graphischen Konstruktion kann man keine Rücksicht auf den letzteren Einfluss nehmen, sondern man muss sich mit den folgenden Ueberlegungen begnügen: Mit der Belastung wird die Stromkurve gewöhnlich mehr spitzig wegen der Deformation des Feldes im Luftzwischenraume; wenn man also mit den Verhältnissen bei Leerlauf rechnet, so rechnet man zu günstig. Dieser Fehler wird annähernd dadurch ausgeglichen, dass man alle dämpfenden Einflüsse, die überhaupt auftreten, vernachlässigt.

IX. Kapitel.

Vorausberechnung von Z_s und $E_s = J x_s$.

Der Kraftfluss Z_s verläuft in Räumen mit verschiedenen magnetischen Leitfähigkeiten, weshalb es zweckmässig erscheint, Z_s und E_s in mehrere Teile zu zerlegen, je nach den Räumen, worin die einzelnen Flüsse verlaufen, um die Rechnung zu erleichtern.

Denkt man sich erst die Armatur aus dem Magnetfelde entfernt und die Wicklung desselben von einem Wechselstrom durchflossen, so werden sich um die einzelnen Nuten herum und durch die Luft ausserhalb der Armaturoberfläche Kraftflüsse bilden. Den Kraftfluss, den hier bei dem Maximalwert des Stromes jede Windung umschlingt, bezeichnen wir mit Z_{s1} und betrachten ihn als einen Teil für sich; denn er bleibt auch bestehen, wenn wir die Armatur wieder in das Feld hineinbringen. Diesen Teil des Kraftflusses, der um die Nuten und durch die Luft verläuft, können wir sowohl experimentell wie rechnerisch bestimmen.

Bringt man die Armatur wieder in das Magnetfeld hinein, so erzeugt der Ankerstrom einen weiteren Kraftfluss, welcher den Luftzwischenraum δ 2mal durchsetzt und sich durch das Feldeisen schliesst. Dieser Fluss ist nur zu stande gekommen wegen des Vorhandenseins der Feldmagnete und kann ebenfalls als ein Teil für sich betrachtet werden. Um diesen zu bestimmen, kann man sich folgende Ueberlegung machen.

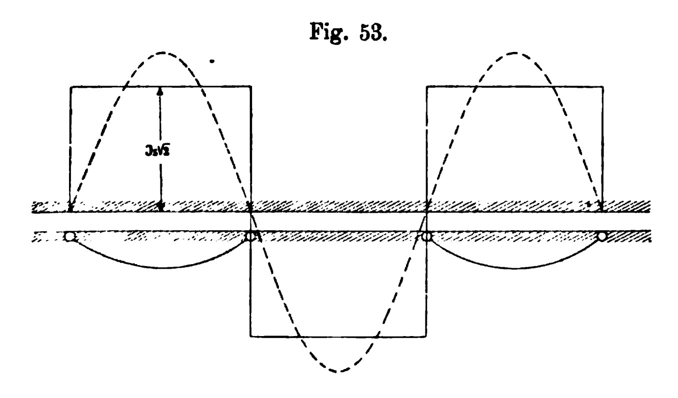
Steht eine volle Eisenfläche der Armaturoberfläche gegenüber, so werden die Ampèrewindungen des Armaturstromes völlig zur Wirkung gelangen, und die Kurve, welche die magnetomotorische Kraft der Ankerwicklung als eine Funktion einer am Ankerumfang gemessenen Länge darstellt, ist eine eckige.

Machen wir die in diesem Falle zulässige Annahme, dass der Eisenwiderstand dem Luftwiderstande gegenüber vernachlässigt werden kann, so würde in diesem Falle die Feldkurve ähnlich der magnetomotorischen Kraftkurve sein; denn der magnetische Widerstand ist überall längs des ganzen Umfanges konstant und gleich dem des Luftzwischenraumes. — Eine Einphasen-Einlochwicklung gibt eine rechteckige magnetomotorische Kraftkurve von der Höhe $J \cdot s \cdot \sqrt{2}$, wenn der Strom Sinusform hat und wo s gleich Stabzahl pro Loch.

Diese kann man in ihre höhere Harmonische auflösen, wie es schon 1895 (L'Eclairage Electric) von A. Blondel gezeigt wurde.

Die Grundwelle (erste Harmonische) dieser magnetomotorischen Kraftkurve hat eine Amplitude von $\sqrt{2}\,J\,.\,s\,.\,\frac{4}{\pi}$, die dritte Harmonische eine von der Grösse $\frac{1}{3}\sqrt{2}\,J\,.\,s\,.\,\frac{4}{\pi}$, die fünfte eine von der Grösse $\frac{1}{5}\sqrt{2}\,J\,.\,s\,.\,\frac{4}{\pi}$ u. s. w. Das sinusförmige Wechselfeld von der Grundwelle erzeugt, kann man sich in zwei Drehfelder zerlegt denken, und jedes wird von einer maximalen magnetomotorischen Kraft $\sqrt{2}\,J\,.\,s\,.\,\frac{2}{\pi}$ erzeugt. Ist die Wicklung eine Mehrlochwicklung oder eine verteilte Wicklung, so muss man die Amplituden der Grundwelle mit dem Wicklungsfaktor f_{w1} und die Amplituden der höheren harmo-

Fig. 53.



nischen Felder mit ihren respektiven Wicklungsfaktoren f_{w3}, f_{w5} u. s. w. multiplizieren, um die Amplituden der Sinusfelder zu erhalten, die man auch durch direkte Auflösung der zackigen Feldkurve, welche zu der betreffenden Wicklung gehört, finden würde.

Soll die Armatur für die Erzeugung von Mehrphasenstrom dienen, so erzeugt jede der m Phasen ein Wechselfeld mit der Amplitude der Grundwelle der magnetomotorischen Kraftkurve gleich $f_{w1}\sqrt{2}\,J\,s\,q\,\frac{4}{\pi}$, und man findet als resultierendes Feld dieser m Wechselfelder, die zeitlich und räumlich um $\frac{1}{m}$ Periode gegeneinander verschoben sind, wie bekannt ein Drehfeld mit der Amplitude der magnetomotorischen Kraftkurve

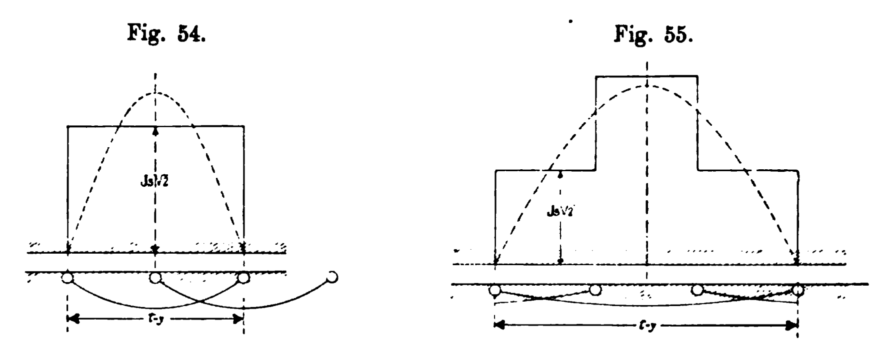
$$\frac{m}{2}\,f_{w1}\sqrt{2}\,J\,.\,s\,.\,q\,\frac{4}{\pi} = m\,f_{w1}\sqrt{2}\,J\,.\,s\,.\,q\,\frac{2}{\pi},$$

wo f_{w1} aus der früher auf S. 27 gegebenen Tabelle zu entnehmen ist. In den Fig. 54 und 55 sind die zackigen Kurven der magnetomotorischen Kraft einer Zweiphasen- und Dreiphasen-Einlochwicklung dargestellt, und durch Auflösung dieser in ihre Harmonische hätte man dasselbe Resultat bekommen.

Die Grundwellen der Armaturwechselfelder liefern bei den Mehrphasenmaschinen das Armaturdrehfeld, welches den Magnetpolen gegenüber still steht, weil beide sich relativ zur Armaturoberfläche synchron bewegen. Bei den Einphasenmaschinen liefert die Grundwelle ein Wechselfeld, welches in zwei Drehfelder von halber Amplitude des Wechselfeldes zerlegt werden kann, wovon das eine den Polen gegenüber still steht.

Die höheren harmonischen Felder bewegen sich relativ zum Magnetfelde, und wenn sie von vornherein nicht ganz verschwindend

Fig. 54. Fig. 55.



sind, werden sie beinahe vollständig von den Wirbelströmen, die sie in den Polschuhen induzieren, vernichtet, weshalb diese Felder späterhin vernachlässigt werden können.

In einem Generator ist die der Armaturoberfläche gegenüberstehende Fläche durch die Lücken zwischen den Polschuhen unterbrochen, und dadurch kommen nicht alle Ampèrewindungen der Armatur zur Wirkung. Ein Teil der Ankerampèrewindungen bewirkt einen entmagnetisierenden Kraftfluss (A), der gezwungen ist, sich durch das Joch zu schliessen, und deswegen einen grösseren magnetischen Widerstand als der in der Luft allein besitzt. Der übrige Teil der Ankerampèrewindungen erzeugt einen quermagnetisierenden Kraftfluss (B), dessen magnetischer Widerstand beinahe ausschliesslich in der Luft liegt (siehe Fig. 56). Deswegen ist es für die Rechnung bequemer, diesen Armaturkraftfluss, herrührend von dem Vorhandensein des Magnetfeldes, in zwei Teile zu zerlegen, und zwar bezeichnen wir den

entmagnetisierenden Kraftfluss mit Z_{s2} und den quermagnetisierenden mit Z_{s3}. Jeder wird durch eine bestimmte Anzahl Ampèrewindungen erzeugt. Man löst deswegen die Grundwelle der magnetomotorischen Kraftkurve, die ein mit den Feldmagneten synchron laufendes Drehfeld erzeugt, in zwei Sinuskurven auf, wovon die eine ihren Maximalwert unter der Mitte des Polschuhes und die andere in der Mitte zwischen den Pollücken hat; beide sind somit um 90° gegeneinander verschoben. — Um die Amplituden dieser zwei Sinuswellen zu bestimmen, muss man die Lage der totalen magnetomotorischen Kraftkurve den Polschuhen gegenüber kennen. Zu dem Zwecke betrachten wir zuerst diejenige Lage des Drehfeldes, für welche keine Phasenverschiebung zwischen der vom Erregerfelde induzierten E.M.K. und dem Ankerstrome existiert, d. h. $\varphi = 0$ ist. In diesem Falle ist der Strom in einer Spulenseite im Maximum, wenn die Spulenseite unter der Mitte des Poles liegt, und die Ankerampèrewindungskurve hat ihr Maximum zwischen den Polschuhen. Der Kraftfluss des totalen Drehfeldes ist deswegen ein **quermagnetisierender Fluss.** Ist dagegen der Strom

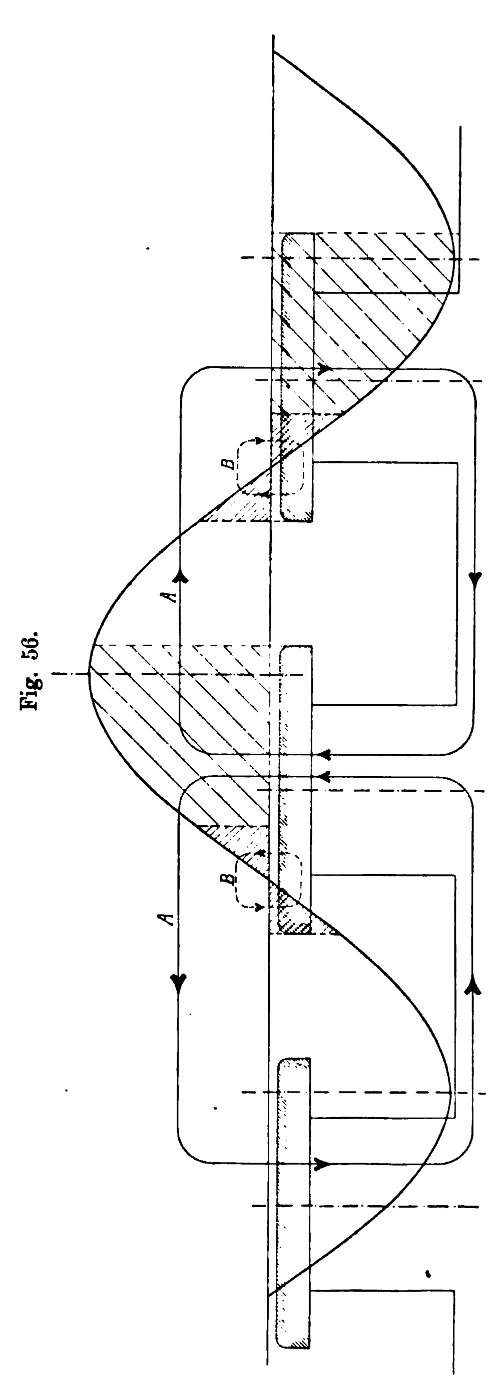


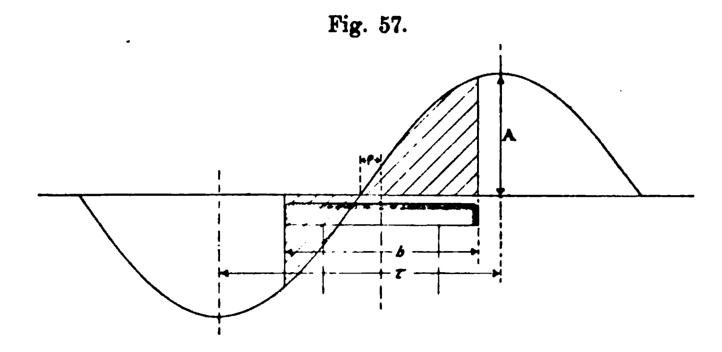
Fig. 56.

um 90° verzögert gegen die induzierte E.M.K., so hat der Strom seinen Maximalwert, wenn die betreffende Spulenseite in der Mitte zwischen den Pollücken liegt; in diesem Falle hat man nur einen entmagnetisierenden Kraftfluss, während 90° Voreilung des Stromes einen magnetisierenden Kraftfluss bewirken würde.

Hat man allgemein eine Phasenverschiebung φ des Stromes gegen die induzierte E.M.K. des Erregerfeldes, so wird die Amplitude der Grundwelle der mit dem Magnetsystem synchron laufenden magnetomotorischen Kraftkurve um den Winkel φ gegen die Mittellinie der Pollücken verschoben, wie Fig. 57 zeigt, indem die Polteilung τ 180° entspricht.

Hieraus folgt, dass für eine Phasenverschiebung φ des Stromes

Fig. 57.



die Amplitude der Sinuskurve, welche die entmagnetisierenden Ampèrewindungen des Armaturstromes darstellt, gleich

$$m\, f_{w1} \sqrt{2}\, J \,.\, s \,.\, q \frac{2}{\pi} \sin \varphi$$

zu setzen ist, während die Amplitude der Sinuskurve der quermagnetisierenden Ampèrewindungen gleich

$$m\, f_{w1} \sqrt{2}\, J \,.\, s \,.\, q \frac{2}{\pi} \cos \varphi$$

wird.

Die entmagnetisierenden Ampèrewindungen erzeugen den Kraftfluss Z_{s2}, dessen Feld um 180° gegen das Erregerfeld verschoben ist. Sie induzieren deswegen eine E.M.K. (E_{s2}) in entgegengesetzter Richtung zu der vom Erregerfelde induzierten E.M.K. (E^p); beide haben fast dieselbe Kurvenform und denselben Faktor k und können deswegen ohne Fehler direkt subtrahiert werden. Die magnetomotorische Kraft der entmagnetisierenden Ampèrewindungen ist nicht unter dem ganzen

Polschuhe konstant wie die der Feldampèrewindungen, sondern folgt einer Sinuskurve; deswegen muss man den Mittelwert nehmen und findet diesen durch Integration von $-\frac{b}{\tau}\frac{\pi}{2}$ bis $+\frac{b}{\tau}\frac{\pi}{2}$.

Ist die Amplitude A sin φ so wird die Mittelordinate der schraffierten Fläche gleich (Fig. 58)

$$A \sin \varphi \frac{\sin\left(\frac{b}{\tau}\frac{\pi}{2}\right)}{\left(\frac{b}{\tau}\frac{\pi}{2}\right)},$$

woraus folgt, dass der Mittelwert der entmagnetisierenden Ampèrewindungen unter dem Polschuhe gleich

$$m f_{w1} \frac{2}{\pi} \sqrt{2} J s q \frac{\sin\left(\frac{b}{\tau}\frac{\pi}{2}\right)}{\frac{b}{\tau}\frac{\pi}{2}} \sin \varphi.$$

Diese Ampèrewindungen wirken aber nicht für sich allein auf den magnetischen Kreis durch das Joch, sondern gleichzeitig mit den

Fig. 58.

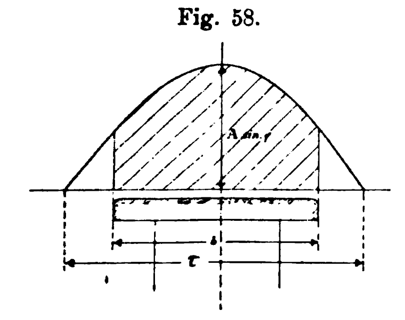
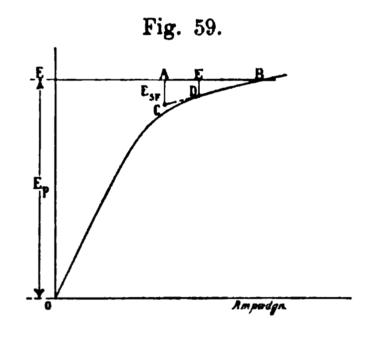


Fig. 59.



Errегerampèrewindungen, so dass in allen Eisenteilen ein gewisser magnetischer Zustand schon vorhanden ist. Deswegen muss man, um Z_{s2} zu bestimmen, die Magnetisierungskurve (Leerlaufcharakteristik) des Generators kennen, und da hier gewöhnlich E^p als Funktion der totalen Ampèrewindungen aller magnetischen Kreise aufgetragen wird, so kann man die entmagnetisierenden Ampèrewindungen pro Kreis mit p multiplizieren. Wir erhalten dann

$$AW_e = \frac{2}{\pi} m p f_{w1} \sqrt{2} J . s . q . \frac{\sin\left(\frac{b}{\tau}\frac{\pi}{2}\right)}{\frac{b}{\tau}\frac{\pi}{2}} \sin \varphi$$

oder, da p . s . q = w gleich totale, in Serie geschaltete Windungen pro Phase, wird

$$AW_e = \frac{2}{\pi} m f_{w1} \sqrt{2} J w \frac{\sin\left(\frac{b}{\tau}\frac{\pi}{2}\right)}{\frac{b}{\tau}\frac{\pi}{2}} \sin\varphi.$$

Mit diesem Wert von AW_e geht man nun in die Fig. 59 und trägt denselben von B aus nach links, wenn φ ein Verzögerungswinkel ist, und sonst nach rechts ab.

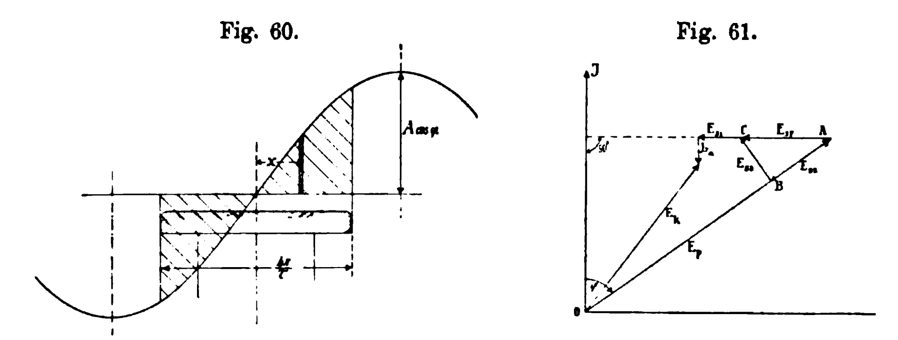
$$BE = AW_e$$

dann ist

$$ED = E_{s2}.$$

Man sieht direkt aus der Fig. 59, dass E_{s2} um so grösser wird, je weniger die Maschine gesättigt ist. Bei Kurzschluss kann E_{s2} bei demselben AW_e leicht bis 5mal grösser werden als bei Belastung.

Fig. 60. Fig. 61.



Die quermagnetisierenden Ampèrewindungen erzeugen den Kraftfluss Z_{s3}, dessen Feld gegen das Erregerfeld um 90° verschoben ist. Die E.M.K (E_{s3}) ist deswegen unter 90° zum Vektor der vom Erregerfelde induzierten E.M.K. (E^p) abzutragen. Hieraus folgt, dass E_{s3} keinen grossen Einfluss auf den Spannungsabfall haben kann, und dies ist sehr günstig, denn Z_{s3} hat eine ganz andere Kurvenform als Z_{max} und somit einen anderen Faktor k.

Die quermagnetisierenden Windungen erzeugen einen Kraftfluss, dessen magnetischer Widerstand hauptsächlich im Luftzwischenraume liegt. Bezeichnen wir mit R_l den magnetischen Widerstand der zwei Lufträume im magnetischen Kreise des Hauptkraftflusses, so ist

$$R_l = \frac{1{,}6\,\delta}{l\,.\,b}$$

und da die magnetomotorische Kraft der quermagnetisierenden Ampèrewindungen unter dem Polschuhe nach einer Sinuskurve verlauft, so findet man

$$Z_{s3} = \int_{x=0}^{x=\frac{b\pi}{2\tau}} 2\,A \cos\varphi \sin x \frac{l \,.\, d\,b}{1,6\,\delta}$$

$$= \frac{2\,l\,A \cos\varphi}{1,6\,\delta} \int_{x=0}^{x=\frac{b\pi}{\tau 2}} \sin x \,.\, d\,x \,.\, \frac{\tau}{\pi}$$

$$= \frac{2\,l\,A \cos\varphi}{1,6\,\delta} \left[1 - \cos\left(\frac{b}{\tau}\,\frac{\pi}{2}\right)\right] \frac{\tau}{\pi}$$

$$= \frac{\left[1 - \cos\left(\frac{b}{\tau}\,\frac{\pi}{2}\right)\right]}{\frac{b}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}} \; \frac{A \cos\varphi}{R_l}.$$

Aehnlich kann man auch Z_{s2} bestimmen (Fig. 58), und zwar ist

$$Z_{s2} = \frac{A \sin\varphi}{C\,R_l} \; \frac{\sin\left(\frac{b}{\tau}\,\frac{\pi}{2}\right)}{\frac{b}{\tau}\,\frac{\pi}{2}},$$

wo C eine Konstante ist, mit der man R_l zu multiplizieren hat um den totalen magnetischen Widerstand des magnetischen Kreises durch das Joch zu finden.

$$\frac{E_{s3}}{E_{s2}} \cong \frac{Z_{s3}}{Z_{s2}} = \frac{1 - \cos\left(\frac{b}{\tau}\,\frac{\pi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{b}{\tau}\,\frac{\pi}{2}\right)}\, C \operatorname{cotg}\varphi = \operatorname{tg}\left(\frac{b}{\tau}\,\frac{\pi}{4}\right) C \operatorname{cotg}\varphi.$$

Betrachten wir nun das Vektordiagramm (Fig. 61) und lassen darin die Stromstärke mit der Ordinatenachse zusammenfallen und tragen den Vektor O A der E.M.K. (E^p) unter dem Winkel φ dazu ab, so kann man von A aus in entgegengesetzter Richtung von E_p E_{s2} abtragen bis B; von B aus normal auf O A soll $E_{s3} = BC$ abgetragen werden.

War nun $\frac{E_{s3}}{E_{s2}} = \operatorname{cotg}\varphi$, so würde A C senkrecht auf der Ordinatenachse stehen, was sie auch als die E.M.K. der Selbstinduktion

des Stromes J thun sollte, wenn der Selbstinduktionskoëffizient eine Konstante wäre. Damit aber $\frac{E_{s3}}{E_{s2}} = \operatorname{cotg} \varphi$ sein kann, muss nach Gleichung S. 79 $C = \operatorname{cotg}\left(\frac{b}{\tau}\,\frac{\pi}{4}\right)$; für $\frac{b}{\tau} = 0{,}75,\ 0{,}55,\ 0{,}35$, sollte $C = 1{,}48,\ 2{,}14,\ 3{,}61$ sein.

Nun muss aber in Betracht gezogen werden, dass $\frac{E_{s3}}{E_{s2}} < \frac{Z_{s3}}{Z_{s2}}$ ist, weil der Wicklungsfaktor des entmagnetisierenden Armaturfeldes viel grösser ist als der des quermagnetisierenden Feldes; deshalb kann $C > \operatorname{cotg}\left(\frac{b}{\tau}\,\frac{\pi}{4}\right)$ sein und AC doch senkrecht auf dem Stromvektor stehen. Wenn man nun ferner in Betracht zieht, dass C zwischen 1 und 5 liegt und dass E_{s3} in Bezug auf den Spannungsabfall keine Rolle spielen kann, weil E_{s3} senkrecht auf E^p abgetragen wird, so nehmen wir an, dass AC stets senkrecht auf dem Vektor J steht; denn selbst wenn man hiedurch einen kleinen Fehler begeht, der für Phasengleichheit ($\varphi = 0$) am grössten wird, so wird das Resultat doch richtiger sein, als wenn die Projektion von OC auf J grösser ausfallen würde als die Projektion von OA auf J, was bei einigen Figuren in dem Aufsatze von A. Blondel in L'Industrie électrique 1899 der Fall ist.

Macht man in Fig. 59

$$BA = \frac{AW_e}{\sin\varphi} = k_0\, m\, J\, w,$$

d. h. gleich den entmagnetisierenden Ampèrewindungen bei rein induktiver Belastung, und zieht die Ordinate AC bis zum Schnitte mit der Geraden BD, so wird

$$E_{s2} = ED = AC\,\frac{BE}{AB} = AC \sin\varphi = E_{sr} \sin\varphi.$$

Man kann nun $AC = E_{sr}$, d. h. die Resultierende der E.M.Ke. E_{s2} und E_{s3}, direkt aus Fig. 59 entnehmen und in Fig. 61 eintragen.

Bis jetzt haben wir angenommen, dass der Strom J Sinusform hat und somit die maximale Stromstärke $\sqrt{2}\,J$ besitzt. Man kann nun noch den Einfluss der Form der Stromkurve auf die Armaturreaktion, d. h. in erster Linie auf die Grössen Z_{s2} und Z_{s3}, untersuchen.

Wir gingen darauf aus, Z_s, d. h. den maximalen Armaturkraftfluss, der mit einer Windung, deren Spulenweite gleich der Polteilung ist, jemals verschlungen wird, zu bestimmen, und dieser ist proportional

der Amplitude f . J des Stromes, wo f der Scheitelfaktor des Stromes einer Phase ist.

Vollständig einwandfrei ist es aber nicht, AWe proportional $f \cdot J \sin \varphi$ zu setzen, wenn man bedenkt, dass der Spannungsabfall besonders abhängig ist von der Aenderung des maximalen Kraftflusses, der eine Spule mit der Weite $y = \tau$ durchsetzt. Dieser maximale Kraftfluss wird von den resultierenden Ampèrewindungen der Feldmagnete und dem Strome, der in diesem Momente die Ankerspulen durchströmt, erzeugt, und dieser Strom braucht nicht gleich $f \cdot J \sin \varphi$ zu sein, sondern kann eine ganz andere Grösse haben, die abhängig ist von der Form der Stromkurve.

Wir setzen daher

$$AW_e = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} m \cdot f_{w1} \cdot \frac{\sin\left(\frac{b}{\tau} \frac{\pi}{2}\right)}{\frac{b}{\tau} \frac{\pi}{2}} \cdot J w \sin \varphi$$

$$= k_0 m J w \sin \varphi,$$

giltig für alle Generatoren.

Nur darf man nicht vergessen, dass bei den Einphasengeneratoren darin nur das eine der beiden Drehfelder berücksichtigt ist, während das andere, das sich mit der zweifachen Geschwindigkeit des Generators relativ zum Magnetfelde bewegt, anders zu berücksichtigen ist; denn es wird zum Teil von den Wirbelströmen in den Polschuhen und den Strömen, die es in den Feldspulen induziert, vernichtet. Hier kann aber folgender Versuch helfen. Schickt man einen Wechselstrom doppelter Periodenzahl durch die Armaturwicklung bei stillstehendem Generator, so wird man in den verschiedenen Lagen der Armatur eine verschiedene E.M.K. der Selbstinduktion haben und somit einen verschiedenen Kraftfluss Z_{s1}. Der Mittelwert von allen diesen wird den Minimalwert, d. h. den Wert, den man bekommt, wenn die Spulenseite sich in der Mitte zwischen den Polschuhen oder die Armatur sich in der Luft befindet, und denjenigen, den man durch Rechnung findet, um einen gewissen Betrag überschreiten, der von dem Wechselfelde mit doppelter Periodenzahl herrührt. Das Drehfeld von doppelter Periodenzahl, das noch zu berücksichtigen ist, hat aber nur eine halb so grosse Intensität als dieses Wechselfeld. Deswegen ist der Zuschlag, den man zum Minimalwert hinzufügen muss, um das Drehfeld doppelter Periodenzahl zu berücksichtigen, nur gleich der Hälfte der Differenz zwischen Mittelwert und Minimalwert. Zur

Benützung bei der Vorausberechnung werden später einige Versuche angegeben, um die Grösse des Zuschlages bei den verschiedenen Verhältnissen α zu zeigen. Statt mit dem berechneten Wert E_{s1} zu rechnen, muss man bei den Einphasengeneratoren E_{s1} mal dem Verhältnis

$$\frac{\text{Mittel} - \text{Minimum}}{2\ \text{Minimum}} + 1 = \frac{\text{Mittel}}{2\ \text{Minimum}} + \frac{1}{2}$$

einführen. In der folgenden Tabelle XIV sind einige Werte für k_o angegeben.

Wir haben jetzt noch Z_{s1} oder E_{s1} zu bestimmen. Dies geschieht, indem man sich die Armatur in der Luft ohne das Feldsystem denkt.

Jeder Leiter erzeugt um sich herum einen Kraftfluss, und dieser kann auch andere Leiter umschlingen, die mit dem ersten in Serie sind. Man muss nun die Summe aller Kraftflussverkettungen, welche von der Stromstärke 1 Ampère erzeugt wird, bestimmen, denn

$$E_{s1} = x_{s1} \, . \, J = 2 \pi c L_{s1} J$$
$$= 2 \pi c J \Sigma (w_x Z_x) 10^{-8}.$$

Die Summe $\Sigma (w_x Z_x)$ rechnet man am bequemsten, wenn man das Gesetz der Superposition anwendet, was hier zulässig ist, weil der grösste magnetische Widerstand in der Luft liegt. Dabei sind folgende Kraftflüsse zu berücksichtigen:

1. der Kraftfluss, welcher jede einzelne Nut für sich zum Teil umschlingt, indem er diese durchsetzt;

2. der Kraftfluss, welcher von einem Zahnkopf zu einem anderen durch die Luft verläuft und eine oder mehrere Nuten umschlingt; und

3. der Kraftfluss, welcher um die Stirnverbindungen (Spulenköpfe) verläuft.

Man wird durch einfache Rechnungen und Integrationen über die angenommenen Kraftflüsse (diese können nie der Wirklichkeit vollständig entsprechen und deswegen würden sie kleiner sein als die wirklich auftretenden Kraftflüsse, wenn keine Schirmwirkungen vorhanden wären) finden, dass

$$x_{s1} = 2 \pi c L_{s1} = \frac{8 s^2 c}{10^8} \Sigma (l_x \lambda_x) \, . \, 2 p q = \frac{16 c w^2}{p q 10^8} \Sigma (l_x \lambda_x),$$

wo

s = Drahtzahl pro Loch in Serie,

q = Lochzahl pro Pol und Phase (bei Einphasengeneratoren die Anzahl der bewickelten Löcher pro Pol),

XIV. Tabelle für k_0.

		Wechselpoltyp					Gleichpoltyp				
α		0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,50	0,45	0,40	0,35	Drei-phasen-genera-toren
$\frac{\sin\left(\frac{b\pi}{\tau . 2}\right)}{\left(\frac{b\pi}{\tau . 2}\right)}$		0,78	0,83	0,88	0,92	0,95	0,64	0,69	0,75	0,81	
Löcher pro Pol und Phase	$q = 1$	0,70	0,75	0,79	0,83	0,865	0,58	0,62	0,67	0,73	
	$q = 2$	0,68	0,73	0,76	0,80	0,84	0,56	0,60	0,65	0,71	
	$q = 3$	0,67	0,72	0,76	0,80	0,83	0,55	0,60	0,65	0,70	
	$q = 4$	0,67	0,72	0,76	0,79	0,83	0,55	0,59	0,65	0,70	
Verteilte Wicklungen	$\frac{S}{\tau} = \frac{1}{3}$	0,67	0,72	0,75	0,79	0,83	0,55	0,59	0,64	0,70	
	$\frac{S}{\tau} = \frac{2}{3}$	0,58	0,62	0,66	0,69	0,72	0,48	0,49	0,53	0,61	
Löcher pro Pol und Phase	$q = 1$	0,70	0,75	0,79	0,83	0,865	0,58	0,62	0,67	0,73	Zwei-phasen-genera-toren
	$q = 2$	0,65	0,69	0,73	0,78	0,80	0,53	0,57	0,62	0,67	
	$q = 3$	0,64	0,68	0,72	0,76	0,79	0,52	0,56	0,71	0,66	
	$q = 4$	0,63	0,68	0,72	0,75	0,77	0,52	0,56	0,61	0,66	
Verteilte Wicklungen	$\frac{S}{\tau} = \frac{1}{2}$	0,63	0,68	0,71	0,75	0,78	0,52	0,56	0,61	0,66	
	$\frac{S}{\tau} = 1$	0,44	0,48	0,50	0,53	0,55	0,37	0,39	0,43	0,46	
Löcher pro Pol total	bewickelt										Ein-phasen-genera-toren
2	1	0,70	0,75	0,79	0,83	0,865	0,58	0,62	0,67	0,73	
4	2	0,65	0,69	0,73	0,78	0,80	0,53	0,57	0,62	0,67	
6	2	0,68	0,73	0,76	0,80	0,84	0,56	0,60	0,65	0,71	
6	3	0,63	0,68	0,72	0,76	0,79	0,52	0,56	0,61	0,66	
9	3	0,67	0,72	0,76	0,80	0,83	0,55	0,60	0,65	0,70	
8	4	0,63	0,68	0,72	0,75	0,77	0,52	0,56	0,61	0,66	
12	4	0,67	0,72	0,76	0,79	0,83	0,55	0,59	0,65	0,70	
Verteilte Wicklungen	$\frac{S}{\tau} = \frac{1}{3}$	0,67	0,72	0,75	0,79	0,83	0,55	0,59	0,44	0,70	
	$\frac{S}{\tau} = \frac{1}{2}$	0,63	0,68	0,71	0,75	0,78	0,52	0,56	0,61	0,66	
	$\frac{S}{\tau} = \frac{2}{3}$	0,58	0,62	0,66	0,69	0,72	0,48	0,49	0,53	0,61	
	$\frac{S}{\tau} = 1$	0,44	0,48	0,50	0,53	0,55	0,37	0,39	0,43	0,46	

also

$w = q \cdot p \cdot s =$ Windungen in Serie pro Phase,
$l_x =$ Drahtlänge in Centimeter für welche λ_x berechnet wird,
$\lambda_x =$ Leitfähigkeit des die Drähte der Spule umgebenden magnetischen Stromkreises pro Centimeter Länge des Drahtes.

Sind die Spulenseiten in Nuten oder Löchern angebracht, so wird für rechteckige offene oder halboffene Nuten die Leitfähigkeit um die Nuten herum

$$\lambda_n = \frac{r}{3\,r_3} + \frac{r_5}{2\,r_3} + \frac{r_6}{r_1 + r_3} + \frac{r_4}{2\,r_1}$$

und für runde Nuten

$$\lambda_n = 0{,}623 + \frac{r_4}{2\,r_1}.$$

Diese Flüsse umschlingen nur die Drähte in einem Loch oder in einer Nut. Für die Flüsse, welche teils durch die Luft ausserhalb der Armaturoberfläche und teils in dem Armatureisen verlaufen, kann kann man für eine glatte Armatur setzen

$$\lambda_s = \frac{1}{\pi}\left(0{,}5 + 2{,}3\,\log\frac{2\,\tau}{S}\right) \backsim 0{,}6 \text{ für } \tau = 2\,S$$

und für Lochanker, wenn

$$q = 1. \quad \lambda_k = \frac{2{,}3}{\pi}\log\left(\frac{\pi\,\tau}{2\,r_1}\right),$$

$$q = 2. \quad \lambda_k = \frac{2{,}3}{\pi}\left[\log\left(\frac{\pi\,t_1}{2\,r_1}\right) + 2\log\left(\frac{\tau}{t_1}\right)\right],$$

$$q = 3. \quad \lambda_k = \frac{2{,}3}{\pi}\left[\log\left(\frac{\pi\,t_1}{2\,r_1}\right) + 0{,}7 + 3\log\left(\frac{\tau}{2\,t_1}\right)\right],$$

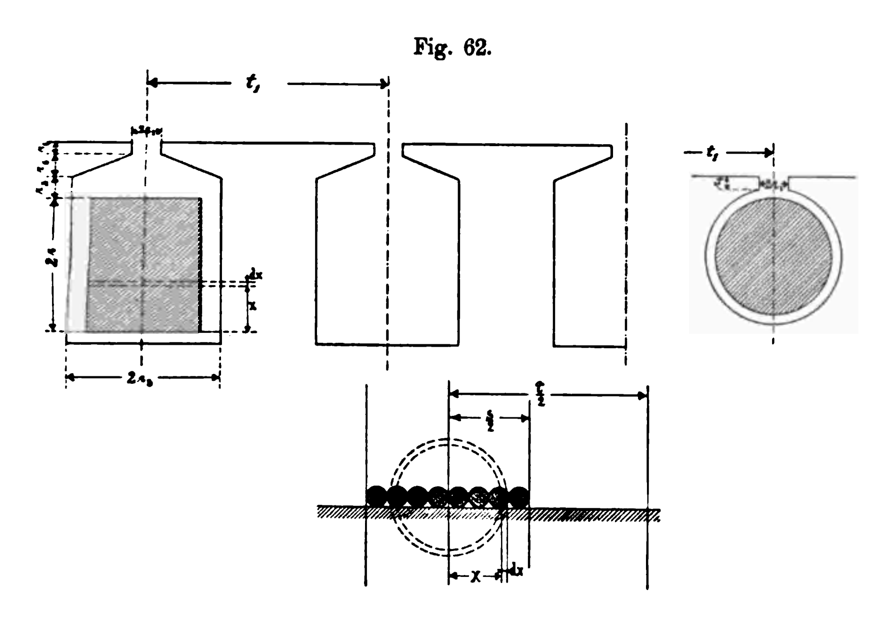
$$q = 4. \quad \lambda_k = \frac{2{,}3}{\pi}\left[\log\left(\frac{\pi\,t_1}{2\,r_1}\right) + 1{,}35 + 4\log\left(\frac{\tau}{3\,t_1}\right)\right],$$

$$q = 5. \quad \lambda_k = \frac{2{,}3}{\pi}\left[\log\left(\frac{\pi\,t_1}{2\,r_1}\right) + 2{,}22 + 5\log\left(\frac{\tau}{4\,t_1}\right)\right].$$

Hier ist die Unterbrechung der Armaturoberfläche durch die Nutenöffnungen nicht berücksichtigt worden, was keine Rolle spielt bei halbgeschlossenen Nuten. Bei ganz offenen Nuten muss man die dadurch verursachte Vergrösserung des magnetischen Widerstandes berücksichtigen, wenn man ganz genau rechnen will.

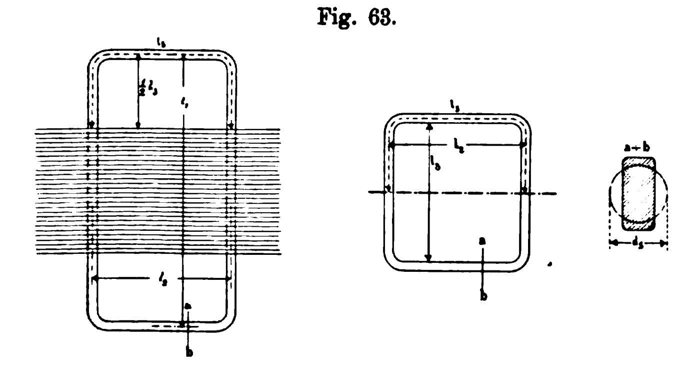
Um die Seitenstücke herum, die sich an den Stirnflächen des Ankers befinden, hat man die unter 3. erwähnten Kraftflüsse, die man am besten durch folgende Ueberlegung abschätzen kann. Das

Fig. 62.



Armatureisen denkt man sich als nicht vorhanden, weil es zum Teil den Kraftfluss vergrössert und weil in dem Gusseisen des Ankers Wirbelströme entstehen, die auf den Kraftfluss dämpfend zurückwirken;

Fig. 63.



diese sich zum Teil kompensierenden Einflüsse sind durch Rechnungen unmöglich zu verfolgen, weshalb sie auch hier vernachlässigt werden. Infolge der bekannten Formel, dass zwei parallel laufende runde Drähte

vom Radius r und mit dem Abstande l eine Selbstinduktion pro Centimeter gleich

$$L = \frac{4}{10^9}\left[\lg_n\left(\frac{l}{r}\right) + \frac{1}{4}\right]$$

besitzen, und infolge der Thatsache, dass zwei zu einander senkrecht stehende Leiterstücke keine induzierende Wirkung aufeinander ausüben, so bekommt man für die in Fig. 63 gezeigte Anordnung

$$L = \frac{4}{10^9}\left[l_2 \lg_n\left(\frac{l_1}{r}\right) + l_3 \lg_n\left(\frac{l_2}{r}\right) + (l_2 + l_3)\,.\,\text{Konst.}\right]\frac{w^2}{2\,p\,q}.$$

Durch exakte wissenschaftliche Rechnungen ergibt sich diese Konstante nicht zu $\frac{1}{4}$, sondern zu ca. — 0,6. Der Ausdruck für L kann etwas umgeformt in folgender Form geschrieben werden:

$$L = \frac{4}{10^9}\,\frac{w^2}{2\,p\,q}\,(l_2 + l_3)\left[\lg_n\left(\frac{l_2 + l_3}{r}\right) + \lg_n\left(\frac{l_1}{l + l_3}\right) - \frac{l_3}{l_2 + l_3}\lg_n\left(\frac{l_1}{l_2}\right) - 0{,}6\right].$$

Betrachten wir den Ausdruck

$$\lg_n\left(\frac{l_1}{l_2 + l_3}\right) - \frac{l_3}{l_2 + l_3}\lg_n\left(\frac{l_1}{l_2}\right)$$

in folgenden Grenzfällen vom praktischen Gebrauch. Fall I:

$$l_1 = 3\,l_2 \text{ und } l_3 = 1{,}5\,l_2,$$

$$\lg_n\left(\frac{l_1}{l_2 + l_3}\right) - \frac{l_2}{l_2 + l_3}\cdot\lg_n\left(\frac{l_1}{l_2}\right) = \lg_n 1{,}2 - \frac{3}{5}\lg_n 3 = -\,0{,}48$$

und Fall II:

$$l_1 = l_2 \text{ und } l_3 = \frac{1}{3}\,l_2,$$

$$\lg_n\left(\frac{l_1}{l_2 + l_3}\right) - \frac{l_2}{l_2 + l_3}\cdot\lg_n\left(\frac{l_1}{l_2}\right) = \lg_n\frac{3}{4} - \frac{1}{4}\lg_n 1 = -\,0{,}29,$$

so sehen wir, dass diese Differenz 0,48 — 0,29 = 0,19 nicht gross ist im Verhältnis zu

$$\lg_n\left(\frac{l_2 + l_3}{r}\right) \backsim \lg_n\frac{50\text{ cm}}{1\text{ cm}} \backsim 4.$$

Wir setzen deswegen der Einfachheit halber

$$L = \frac{4}{10^9}\,(l_2 + l_3)\left[\lg_n\left(\frac{l_2 + l_3}{r}\right) - 1\right]\cdot\frac{w^2}{2\,p\,q},$$

$l_2 + l_3 = l_s$ = Länge eines Spulenkopfes und $2\,r = d_s \backsim$ Durchmesser

eines Kreises von demselben Umfange wie die Stirnverbindung einer Spule (die Isolation zwischen den Drähten wird mitgerechnet). Also

$$L = \frac{4\, l_s}{10^9}\left[\lg_n\left(\frac{l_s}{d_s}\right) - 0{,}31\right]\frac{w^2}{2\,p\,q},$$

oder

$$\lambda_s \cong \frac{2{,}3}{\pi}\left[\log\left(\frac{l_s}{d_s}\right) - 0{,}2\right].$$

Liegen die Spulenköpfe der Spulen von q Nuten dicht nebeneinander, wird

$$\lambda_s \cong \frac{2{,}3}{\pi}\, q\left[\log\frac{l_s}{d_s} - 0{,}2\right],$$

wo d_s dann gleich dem Durchmesser eines Kreises von ungefähr demselben Umfange wie der totale Umfang der Stirnverbindungen aller Spulen (die Isolation und der Luftzwischenraum mitgerechnet).

Es ist nun für Lochanker

$$\Sigma\, l_x \lambda_x = l\,\lambda_n + l\,\lambda_k + l_s \lambda_s$$

und für glatte Anker

$$\Sigma\, l_x \lambda_x = l\,\lambda_g + l_s \lambda_s$$

Die Konstante − 0,2 ist reichlich gross gewählt; denn denkt man sich das Armatureisen weggenommen und die Stirnverbindungen zu einer ringförmigen Spule zusammengesetzt, wie die Figur zeigt, so gilt für diese rektanguläre Schleife dieselbe Formel wie oben, nur ist die Konstante hier − 0,226 und also L ein ganz wenig kleiner als nach der obigen Formel; diese gibt infolgedessen eher zu kleine als zu grosse Werte für die Verhältnisse, wie sie liegen, wenn die Armatur in der Luft angebracht ist. Ist die Armatur dagegen im Felde gelagert und liegen die Spulenseiten in der Mitte zwischen den Polschuhen, so kann der Teil des Armaturkraftflusses, welcher durch die Pole und das Joch geht, unter Umständen kleiner ausfallen als der entsprechende Teil, wenn die Armatur in der Luft liegt. Deshalb verwenden wir die Formel in der obigen Form.

Hat man ganz geschlossene Nuten, so muss der Kraftfluss durch den Steg der Nut noch berücksichtigt werden, und zwar anders als die bis jetzt behandelten Flüsse, weil dieser unabhängig von der Stromstärke ist. In dem Steg wird sich schon bei kleiner Stromstärke eine grosse Sättigung einstellen. Nehmen wir die zu 22500 an, so wird dieser Kraftfluss eine E.M.K.

$$E_s' = \frac{4{,}44\, c\, w}{10^8} \,.\, 22500 \,.\, l \,.\, 2\,\delta' = \frac{2\, c\, w}{10^3} \,.\, l \,.\, \delta' \text{ Volt}$$

induzieren, wo δ' = Stärke des Steges in Centimetern, welche in guten Maschinen nicht 0,1 bis 0,2 mm überschreiten darf, so dass die Aufschlitzung der Nuten nur die Selbstinduktion um 5 bis 10% verkleinern würde.

Die grosse Induktion in den Stegen wird aber bei $\cos\varphi = 1$ die magnetische Leitfähigkeit des Luftzwischenraumes für den Hauptkraftfluss gegenüber dem Zustande bei Leerlauf verkleinern, wodurch die Erregung gesteigert werden muss.

Wir haben hier den Einfluss der übrigen Phasen auf E_{s1} vernachlässigt, was auch in beinahe allen Fällen zulässig ist. Nur da, wo die Spulenseiten zweier Phasen in derselben Nut (z. B. bei einer Dreiphasenzackenarmatur mit $y = \frac{2}{3}\tau$) untergebracht ist, braucht man die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Phasen bei der Berechnung von E_{s1} zu berücksichtigen, und zwar geschieht es in dem oben erwähnten Falle durch Multiplikation mit 1,5.

Um die Formel für x_{s1} zu prüfen, haben wir einige der Versuche von Parshall und Hobart (Engineering, Vol. 70, p. 144) nachgerechnet, so gut es möglich war, und folgende Resultate erhalten, indem wir als Vergleichszahl $\frac{1}{l}\Sigma(l_x\lambda_x)$ angeben.

q =	Berechnet	Beobachtet		Mittel	$\left(\frac{\text{Mittel}}{2\text{ Minim.}}+\frac{1}{2}\right)$	Periodenzahl c
		Minim.	Maxim.			
1	1,85	2,0	3,44	2,7	1,2	125
1	2,78	2,8	5,36	4,1	1,23	125
1	1,55	2,35	3,8	3,1	1,16	60
1	2,35	3,1	3,9	3,5	—	60
1	2,35	2,0 (?)	5,4	3,7	—	60
1	2,4	4,5	8,5	6,5	—	25
2	1,5	2,9	4,3	3,6	—	25
2	2,05	3,2	5,5	4,35	—	30
4	1,20	2,06	3,0	2,5	—	30

Hieraus geht hervor, dass die berechneten Werte um so besser mit den durch Versuch gefundenen Werten übereinstimmen, je grösser die Periodenzahl ist, die bei dem Versuch gebraucht wird, wobei die Armatur so gedreht ist, dass die Spulenseiten der untersuchten Spule in der Mitte zwischen den Polschuhen liegen. Für diese Lage ist die Selbstinduktion nämlich ein Minimum. Dass die Nichtübereinstimmung zwischen der Berechnung und den Versuchen bei den kleineren Periodenzahlen von der Anwesenheit des Feldes herrührt, ist ziemlich sicher,

da die Schirmwirkung proportional mit der Periodenzahl zunimmt. Ferner wurde für die Armatur einer Maschine im hiesigen Laboratorium gefunden, dass $\frac{1}{l}\Sigma(l_x\lambda_x)$ folgende Werte ergab:

Armatur in der Luft bei 50 Perioden . . .	5,94
„ im Felde „ 50 „ . . .	7,56
„ „ „ „ 150 „ . . .	6,15
und berechnet war $\frac{1}{l}\Sigma l_x\lambda_x$ zu	5,8

Bei den Einphasengeneratoren muss man die berechnete E.M.K. E_{s1} mit dem Verhältnis $\left(\frac{\text{Mittel}}{2\ \text{Minimum}}+\frac{1}{2}\right)$ multiplizieren; dieses findet man aus der obigen Tabelle zu ca. 1,2, welcher Wert für lamellierte Pole und $\alpha = 0{,}65$ Giltigkeit hat.

X. Kapitel.

Die Vorausberechnung der charakteristischen Kurven und die Untersuchung einer Wechselstrommaschine.

Die Untersuchung einer Maschine erstreckt sich gewöhnlich auf die Spannungsänderungen infolge Veränderung der Belastung, den Wirkungsgrad, die Erwärmung und die Isolation derselben. Wir wollen uns nur mit der Ermittelung der Spannungsänderungen befassen.

Die Regulierfähigkeit der Spannung untersucht man durch Aufnahme der äusseren Charakteristik, d. h. der Kurve, welche die Spannung als Funktion der Belastung oder der Stromstärke bei konstanter Erregung und konstanter Tourenzahl angibt.

Man kann nun entweder von Leerlauf ausgehen und die Maschine belasten ohne die Erregung und die Tourenzahl zu ändern, oder man kann von dem Belastungszustande ausgehen und die Maschine allmählich entlasten, während die Tourenzahl konstant gehalten und die Erregung unberührt gelassen wird. Für jede Versuchsreihe oder Kurve wird der Leistungsfaktor $\cos\varphi_a$ des äusseren Stromkreises konstant gehalten. Oft nimmt man mehrere Kurven auf, und zwar bei verschiedenen Leistungsfaktoren, z. B.

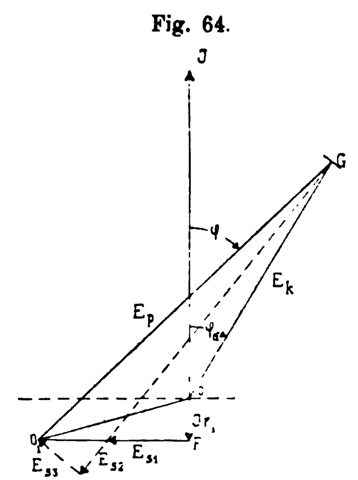
$$\cos\varphi_a = 1;\ \cos\varphi_a = 0{,}8 \text{ und } \cos\varphi_a = 0.$$

Bei der Vorausberechnung einer Maschine hat ferner die Regulierungskurve Interesse; diese stellt nämlich bei Konstanthaltung der Klemmenspannung, des Leistungsfaktors und der Tourenzahl die Erregerstromstärke als Funktion der Ankerstromstärke dar. Man kann eine Kurve für jede der drei obigen Leistungsfaktoren aufzeichnen und diese dienen zur Dimensionierung der Erregerwickelung und des Regulierwiderstandes.

Häufig berechnet man noch die Belastungscharakteristik bei den drei verschiedenen Leistungsfaktoren; diese stellt die Klemmenspannung der Maschine als Funktion des Erregerstromes bei konstanter Ankerstromstärke und konstantem Leistungsfaktor dar.

Die Vorausbestimmung dieser Charakteristiken lässt sich, wie bekannt, leicht durchführen, wenn die Reaktanz x_a und der Widerstand r_a der Armatur bekannte und konstante Grössen sind.

Fig. 64.



Die Reaktanz ist aber nicht konstant, sondern abhängig sowohl von dem Armaturstrome und der Erregung als von dem Leistungsfaktor cos φ, bei dem die Maschine arbeitet; φ ist der innere Phasenverschiebungswinkel des Stromes. Wollte man ganz exakt verfahren, was für die Praxis keinen Zweck hat, da r_a und x_a ziemlich schwierig genau zu bestimmen sind, so würde man auf komplizierte Konstruktionen und Korrekturrechnungen kommen. Man verfährt deswegen in folgender einfacherer und doch ziemlich genauer Weise.

Die Leerlaufscharakteristik sei als bekannt vorausgesetzt und zu bestimmen ist die äussere Charakteristik beim Belasten der Maschine. Der Leistungsfaktor cos φ_a des äusseren Stromkreises ist z. B. gegeben zu 0,8; dadurch ist aber φ nicht gegeben und AW_a von vornherein nicht bekannt. Also können wir E_{s2} nicht genau berechnen und tragen in Fig. 59 $AW_e' = k_0 m J w \sin \varphi_a$ von B nach E und $k_0 m J w = BA$ ab; AC gibt uns somit angenähert E_{sr}. In dem Vektordiagramm Fig. 64 wird nun $OF = Jr_a$ und $FO_1 = E_{s1} + E_{sr} = Jx_{s1} + AC$ abgetragen; OO_1 ist also gleich Strom mal Impedanz des Ankers. Die Richtung des Stromvektors fällt mit der positiven Richtung der Ordinatenachse zusammen; ein Strahl unter dem Winkel φ_a zur Ordinatenachse gibt somit die Richtung der Klemmenspannung E_k

an. Auf diesem Strahl wird nun $O\,G = E_k$ abgeschnitten, wenn man mit E_p im Zirkel, einen Kreis um O_1 schlägt. Für jede Belastung oder jede Stromstärke wird ein neuer Punkt O_1 erhalten und zu jedem Punkte O_1 gehört auch ein Punkt G. In dieser Weise werden bei verschiedenen Belastungen die entsprechenden Klemmenspannungen ermittelt und als Funktion der ersten aufgetragen, und die dadurch entstandene Kurve ist die äussere Charakteristik.

Die verschiedenen Punkte O_1 werden aber nicht auf einer geraden Linie, sondern auf einer krummen Kurve liegen, die im allgemeinen konvex nach unten ist. Sind aber die Nuten geschlossen, so

Fig. 65.

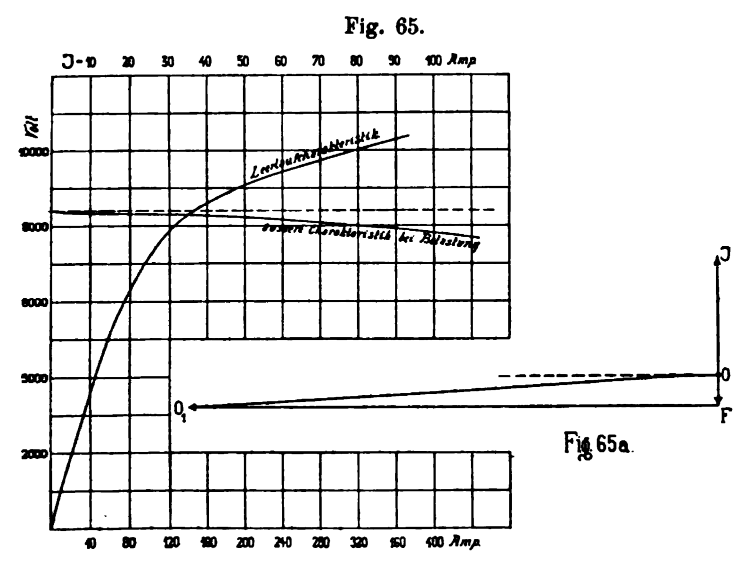


Fig. 65a.

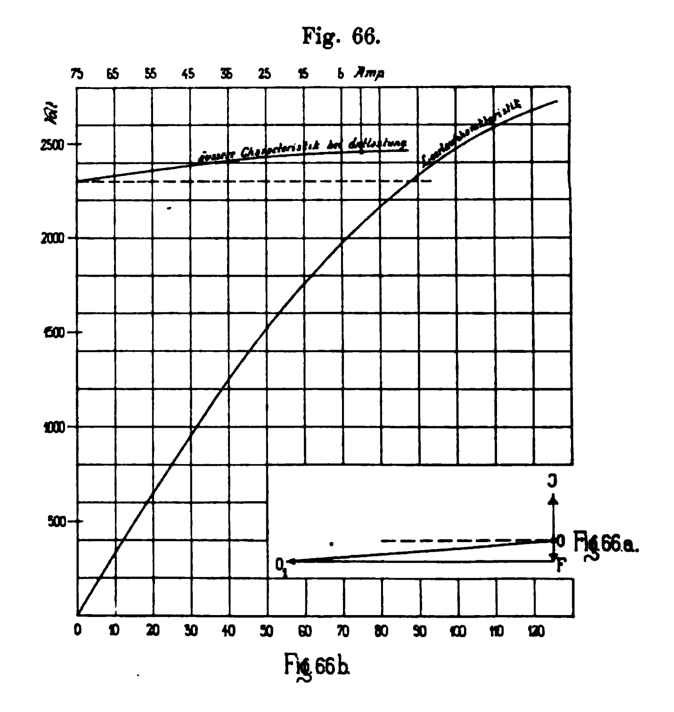
Fig. 65b.

wächst bei kleinen Stromstärken $J\,x_a$ langsamer als $J\,r_a$, bei mittleren Stromstärken proportional mit $J\,r_a$ und bei grösseren Stromstärken wächst $J\,x_a$ schneller wie $J\,r_a$. Dadurch wird die Kurve $O\,O_1'$ auf dem ersten Teil konkav nach unten, geht alsdann durch einen Wendepunkt und wird von jetzt ab konvex nach unten, wie die Fig. 65a zeigt. Die entsprechende äussere Charakteristik ist in Fig. 65b dargestellt und beide Kurven beziehen sich auf die in Paderno von Brown, Boveri & Co. aufgestellten Drehstromgeneratoren. — Bei kleinen Belastungen fällt also bei geschlossenen Nuten die Klemmenspannung sehr schnell ab, um dann langsam und bei grossen Belastungen wieder schnell zu fallen. Da man aber selten bei den ganz kleinen Be-

lastungen arbeitet, wirkt der grosse Spannungsabfall auf die Regulierung derselben am Anfang nicht sehr unangenehm. Die geschlossenen Nuten haben aber doch insofern einen schädlichen Einfluss auf den Spannungsabfall bei grösseren Belastungen, als hier die innere Phasenverschiebung des Stromes grösser wird als bei offenen Nuten.

Wünscht man die äussere Charakteristik beim Entlasten der Maschine zu konstruieren, so bestimmt man zuerst die Erregung, die nötig ist, um bei Belastung die normale Klemmenspannung zu erhalten, von der wir ausgehen werden. Kennt man diese Feld-

Fig. 66.



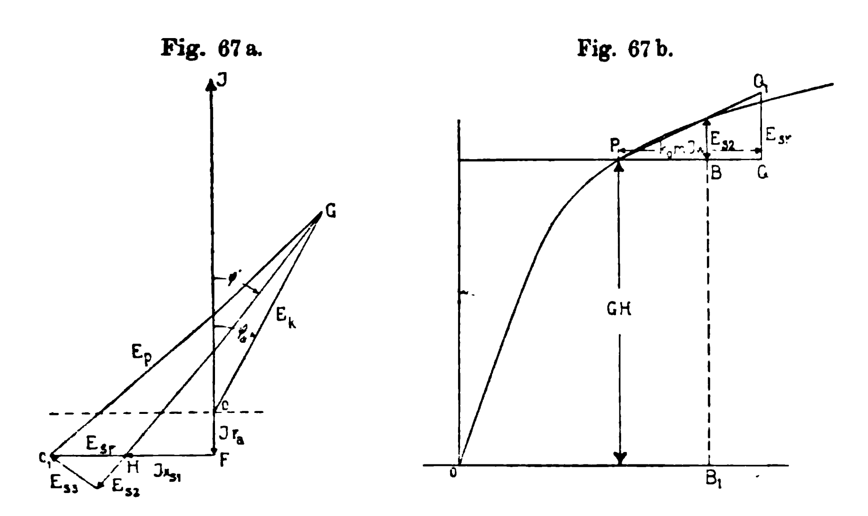
erregung, die konstant gehalten wird, so ist der Punkt B bekannt und es kann nun dieselbe Konstruktion wie oben benutzt werden, um die Klemmenspannung bei den verschiedenen Belastungen zu bestimmen. Fig. 66a und b geben die Kurven für die von der Gesellschaft für elektrische Industrie, Karlsruhe, aufgestellten Drehstromgeneratoren in dem Karlsruher Elektrizitätswerk.

Um die Erregung bei Belastung zu finden, trägt man (siehe Fig. 67a) $OF = Jr_a$ und $FH = E_{s1}$ ab. Von dem zu der E.M.K. HG entsprechenden Punkte O der Leerlaufscharakteristik werden die entmagnetisierenden Ampèrewindungen $AW_e' = k_0 \, m \, J w \sin \varphi'$ nach

rechts von P bis B (Fig. 67 b) und k_0 m J w = P Q abgetragen; H O_1 wird gleich Q Q_1 = E_{sr} gemacht und G O_1 ist somit die bei Leerlauf induzierte E.M.K. E_a, deren entsprechende Erregung bei Belastung die normale Klemmenspannung ergibt. Aus der Fig. 67 a geht deutlich hervor, dass die gesuchte Erregung angenähert gleich O B_1 in Fig. 67 b ist.

Wünscht man die Regulierungskurve zu konstruieren, so führt man die eben beschriebene Konstruktion für verschiedene Belastungen aus und trägt die gefundenen Erregungen O B als Funktion von der

Fig. 67 a. Fig. 67 b.



Belastung auf. Fig. 68 gibt ein Bild der Regulierungskurve der Padernomaschinen für cos φ_a = 0,8.

Zuletzt ist noch die Belastungscharakteristik zu konstruieren; die Konstruktion besteht nur in der Bestimmung der Klemmenspannung bei konstanter Stromstärke und konstantem Leistungsfaktor für mehrere verschiedene E.M.Ke. Wenn es nicht auf grosse Genauigkeit ankommt, kann die Konstruktion in der Weise vereinfacht werden, dass man die entmagnetisierenden Ampèrewindungen direkt von den gegebenen Feldampèrewindungen subtrahiert und die zu den resultierenden Ampèrewindungen entsprechende E.M.K. wird als Strecke H G (Fig. 67 a) abgetragen, wodurch sich die Klemmenspannung O G ergibt.

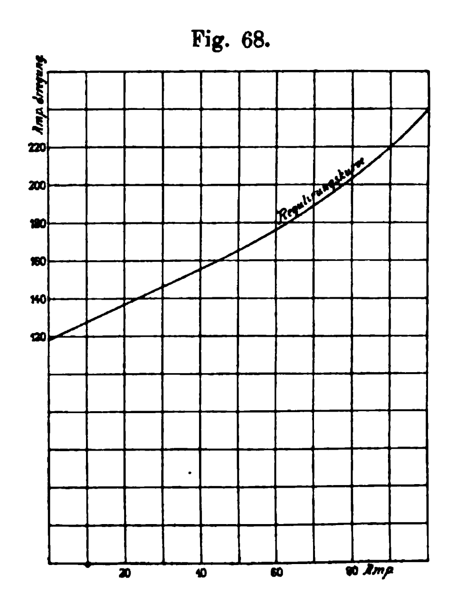
Besonders interessant ist die Belastungscharakteristik bei cos φ = 0; die Bedeutung dieser Kurve zur Vorausbestimmung der Konstante x_a des Generators ist von A. Blondel und Potier angegeben

worden. — In diesem Falle fällt E_k mit der positiven Richtung der Abscissenachse zusammen und E_a wird fast unabhängig von $J r_a$; deswegen kann die Belastungscharakteristik bestimmt werden, indem man einfach von den gegebenen Erregerampèrewindungen in Fig. 69 $A W_e = B A$ subtrahiert und von der, den resultierenden Ampèrewindungen entsprechenden E.M.K. $0_1 C$ die Strecke $C D = J x_{s1}$ subtrahiert. Da $C D = J x_{s1}$ und $D E = A B = J \cdot k_0 m w$, wird

$$tg\, \varphi_0 = \frac{C D}{D E} = \frac{x_{s1}}{k_0 m w} = \text{konstant.}$$

Hält man J konstant und ändert die Erregung, so verschiebt sich das kleine Dreieck C D E parallel mit sich selbst, indem C der

Fig. 68.



Leerlaufscharakteristik folgt und E die Belastungscharakteristik beschreibt. Die zwei Charakteristiken sind äquidistante Kurven und die eine kann aus der anderen durch Parallelverschiebung um die Strecke C E abgeleitet werden. Da $A W_e$ leicht genau zu berechnen ist, hat man hier eine Methode, um x_{s1} zu bestimmen; es ist aber schwierig, einen derartigen Belastungswiderstand herzustellen, und besonders für grosse Maschinen, so dass cos φ gleich oder annähernd gleich Null wird, weshalb diese Methode etwas an Bedeutung verliert.

Eine zweite Kurve, die oft zur Bestimmung der Konstanten des Generators benutzt wird, ist die Kurzschlusskurve, welche die

Stromstärke der kurzgeschlossenen Armatur als Funktion der Erregerampèrewindungen darstellt. Diese lässt sich auch voraus konstruieren; denn man bestimmt das rechtwinklige Dreieck OFH (Fig. 67a) mit den Katheten $J\,r_a$ und $J\,x_{s1}$; da die innere Phasenverschiebung, wenn die Wirbelstromverluste nicht gross sind, annähernd 90^0 ausmacht, kann $A\,W_e = k_0\, m\, J\, w$ gesetzt und die dazu entsprechende E_{sr} direkt zu OH addiert werden; diese ganze Konstruktion ist aber nicht vollständig zuverlässig, weil die Kurvenform der verschiedenen E.M.Ke., die geometrisch addiert werden, nicht dieselbe ist und unter Umständen von sehr komplizierter Natur sein kann. Bei den meisten grösseren Maschinen mit α kleiner als 0,70 und mit verteilten Wicklungen von kleinem Widerstande r_a wird die Konstruktion doch einiger-

Fig. 69.

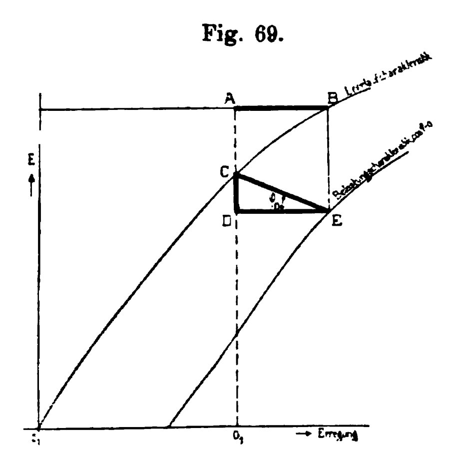
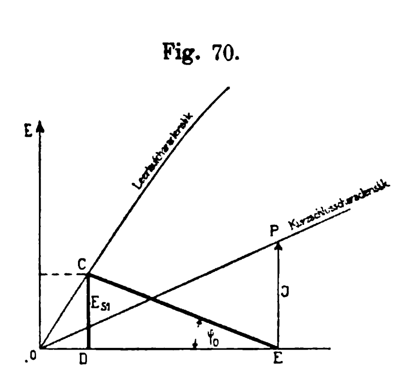


Fig. 70.



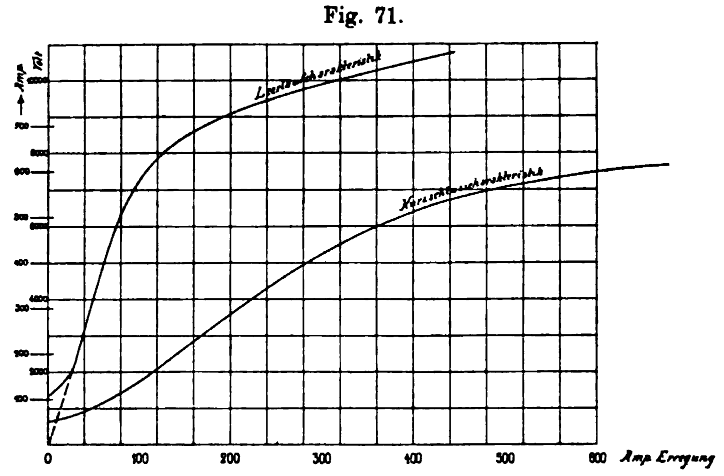
massen richtige Werte ergeben, und sie kann dann in folgende einfachere Form gebracht werden. $J\,r_a$ wird vernachlässigt und $J\,x_{s1} = E_{s1}$ in der Leerlaufscharakteristik $=$ C D (Fig. 70) abgetragen; zu den resultierenden Ampèrewindungen O D addiert man $A\,W_e =$ D E und trägt den Armaturstrom als Ordinate der Abscisse O E auf. Das Dreieck C D E hier ist dasselbe wie in Fig. 69. Die Kurzschlusskurve kann deswegen konstruiert werden, indem man schräge Linien C E unter den Winkel φ_0 zur Abscissenachse zieht und in E eine Ordinate E P proportional D E abträgt.

Besitzt die Armatur geschlossene Nuten, so wird die Stromstärke J bei den kleinen Erregungen sehr klein und die Kurzschlusskurve auf dem unteren Teil konvex nach unten. Bei den grösseren Erregungen dagegen wächst die Ampèrewindungszahl schneller als die Armaturstromstärke und die Kurzschlusskurve ist bei diesen Er-

regungen konkav nach unten. Die Kurzschlusskurve eines solchen Generators besitzt deswegen einen Wendepunkt bei den mittleren Erregungen und bekommt eine S-Form, die noch deutlicher zum Vorschein kommt, wenn viel Gusseisen in der Maschine ist, wie in den älteren Typen. In diesem Falle hat die Maschine nämlich bedeutende Remanenz und die Leerlaufscharakteristik ist bei grösseren Erregungen stark gekrümmt. Die Fig. 71 gibt ein Beispiel davon.

Bei Kurzschluss wird durch den Armaturkern nur ein Kraftfluss entsprechend der E.M.K. E_{s1} fliessen und zu dieser kann man die entsprechenden Hysteresisverluste bestimmen. Werden diese, sowie die Reibungsverluste und die Erregerverluste von der totalen Leistung, die der Maschine zugeführt wird, abgezogen, so erhalten wir die durch

Fig. 71.



den Armaturstrom hervorgerufenen Verluste, und da diese gleich $J^2 r_a$ gesetzt werden, so kann der effektive Widerstand r_a in dieser Weise bestimmt werden. — Es ist oft und besonders bei den grossen Maschinen umständlich und schwierig, den Spannungsabfall und den Wirkungsgrad derselben direkt durch Belastung zu untersuchen. In den Fällen ist es dann zweckmässig, diese Verhältnisse der Maschinen direkt zu kontrollieren, was durch folgende Versuche geschehen kann.

1. Ermittelung der Leerlaufsarbeit der unerregten Maschine.

2. Ermittelung der Leerlaufsarbeit der erregten Maschine. Die Erregung ist gleich derjenigen der vollbelasteten Maschine bei normaler Spannung und $\cos \varphi = 1$ zu machen.

3. Die Aufnahme der Leerlaufcharakteristik.

4. Die Ermittelung der Leistung, welche die Maschine bei kurz geschlossenem Anker verbraucht. Um die dem normalen Ankerstrome entsprechenden Verluste berechnen zu können, muss der Kurzschlussstrom gleich der normalen Stromstärke sein.

5. Die Aufnahme der Kurzschlusscharakteristik.

6. Die Ermittelung der Reaktanz. Man schickt einen Wechselstrom von hoher Periodenzahl durch eine Phase der Armatur der stillstehenden Maschine bei kurz geschlossener Erregerwicklung. Hieraus kann x_{s1} und r_a berechnet werden.

Ist die Armatur nicht im Felde angebracht, so kann nur x_{s1} bestimmt werden und eben diese Methode bietet ein einfaches Mittel zur indirekten Bestimmung des Spannungsabfalles eines Generators. Da AW_e mit jeder gewünschten Genauigkeit berechnet werden kann, so beruht die Vorausbestimmung des Spannungsabfalles hauptsächlich auf einer richtigen Bestimmung von x_{s1}.

Sobald die Armatur in der Fabrik fertig gewickelt ist, schickt man einen Wechselstrom durch eine Phase der Wicklung und bestimmt x_{s1} durch Messung von Strom und Spannung; denn in den meisten Fällen ist der Widerstand der Wicklung so klein, dass er bei der Berechnung von x_{s1} vernachlässigbar ist. Ist er dagegen bedeutend, so muss die der Wicklung zugeführte Leistung mittels Wattmeter gemessen werden. (Bei Einphasenmaschinen verfährt man umständlicher wie auf S. 82 beschrieben.)

7. Belastung bei $\cos\varphi \backsim 0$. Man belastet z. B. die zu untersuchende Maschine mit Armaturen stillstehender Maschinen, die eine grosse Reaktanz haben und nimmt einige Punkte einer oder mehrerer Belastungscharakteristiken für $\cos\varphi \backsim 0$ auf, welche Werte auch zur Bestimmung von x_{s1} dienen.

Aus den vier ersten Versuchen ergibt sich der Wirkungsgrad.

Ferner kennt man jetzt x_{s1} und r_a; $k_0\, m\, J\, w$ ist auch bekannt, woraus folgt, dass man für jeden Zustand, den man untersuchen will, das Dreieck $O\,F\,O_1$ zeichnen und den Spannungsabfall oder die Spannungserhöhung bestimmen kann.

Führt man für $F\,O_1 = E_{s1} + E_{sr}$ einen Mittelwert ein, der für eine konstante Stromstärke und alle Phasenverschiebungen ungefähre Giltigkeit haben kann, so lässt die prozentuale Spannungsänderung für eine beliebige Phasenverschiebung sich wie folgt genau bestimmen.

a) Ist der prozentuale Spannungsabfall zu bestimmen, so trägt man zuerst $O\,O_1$ in irgend einem Verhältnis zu der gegebenen

Klemmenspannung E_a bei Leerlauf ab und beschreibt über diese Strecke als Durchmesser einen Kreis $O F O_1$. Der Strahl $O G$ unter dem Winkel φ_a zur Ordinatenachse schneidet den Kreis im Punkt P. $O P$ im Verhältnis von E_a heissen wir u und $O_1 P$ im Verhältniss von E_a v (Fig. 72). Ist $E_a = O_1 G = 1$, wird $O P = u$, $O_1 P = v$ und

$$E_k = O G = \sqrt{1 - v^2} \mp u,$$

also

$$\frac{E_a - E_k}{E_a} = \pm u + 1 - \sqrt{1 - v^2}$$

$$= \pm u + \frac{v^2}{2} + \frac{v^4}{8} + \ldots\ldots$$

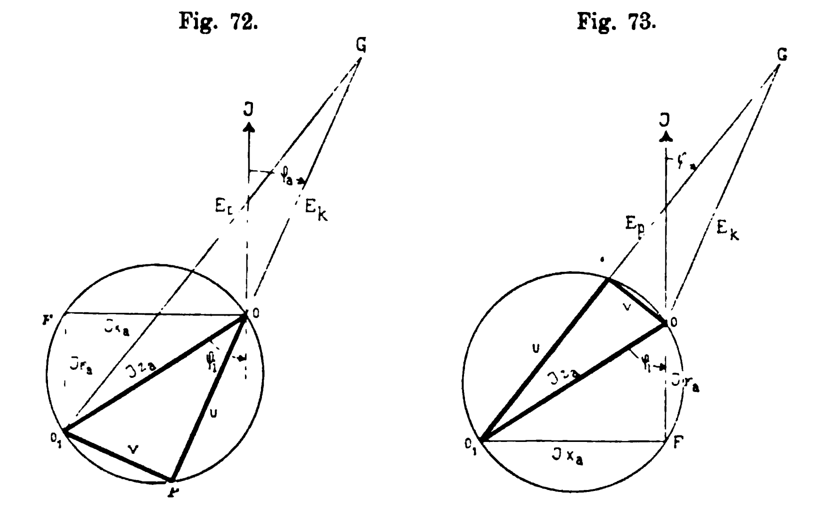


Fig. 72. Fig. 73.

Ist $v = 0{,}\dot{3}$, welche Grenze selten überschritten wird, so wird $\frac{v^4}{8} = \frac{1}{1000}$, d. h. $^1/_{10}$ % und kann vernachlässigt werden.

Wird $O O_1$ in Prozenten von E_a abgetragen, so erhält man auch u und v in Prozenten von E_a und den

$$\text{prozent. Spannungsabfall} = \pm u + \frac{v^2}{200}.$$

Das negative Vorzeichen für u gilt, wenn der Strahl $O G$ den Kreis auf der oberen Hälfte schneidet, d. h. bei so grossen Phasenvoreilungen, dass $\varphi_a > 90^0 - \varphi_i$ ist.

b) Ist die prozentuale Spannungserhöhung zu bestimmen, so wird $O O_1$ in Prozenten von der gegebenen Klemmenspannung E_k bei Be-

lastung abgetragen und indem man den Schnittpunkt des Strahles $0_1 G$ hier mit dem Kreis mit P bezeichnet, wird (siehe Fig. 73)

$$\frac{E_a - E_k}{E_k} = \pm u - (1 - \sqrt{1 - v^2}) = \pm u - \frac{v^2}{2}$$

oder die

$$\text{prozent. Spannungserhöhung} = \pm u - \frac{v^2}{200}.$$

Diese Berechnung des Spannungsabfalles wird auch bei den Transformatoren Verwendung finden können.

XI. Kapitel.

Beispiele.

1. Als erstes Beispiel kann die kleine Schuckertsche Maschine von vorhin dienen.

In den Fig. 74 bis 81 sind für alle acht Polschuhe die folgenden vier Kurven dargestellt:

Die Leerlaufscharakteristik ist mit I,

die Belastungscharakeristik für $\cos\varphi = 1$ und $J = 20$ Ampère mit II,

die äussere Charakteristik beim Belasten und $\cos\varphi = 1$ mit III und

die Kurzschlusscharakteristik mit IV bezeichnet.

Trotzdem, dass die Feldkurven bei Kurzschluss, wie aus den Fig. 45a bis 52a ersichtlich ist, sehr deformiert sind, haben wir doch versucht

erstens x_{s1} aus der Kurzschlusscharakteristik zu bestimmen, und wie die nachstehenden Zahlen zeigen, sind die erhaltenen Werte annäherungsweise richtig. Diese Thatsache ist dadurch zu erklären, dass die Armaturwicklung eine verteilte ist. Zuerst wurde aus den Feldkurven bei Kurzschluss (Fig. 45a bis 52a) die innere Phasenverschiebung φ zu 60^0 geschätzt und mit dieser als Ausgangspunkt die entmagnetisierenden Ampèrewindungen

$$A\,W_e = k_0\, m\, J\, w \sin\varphi$$

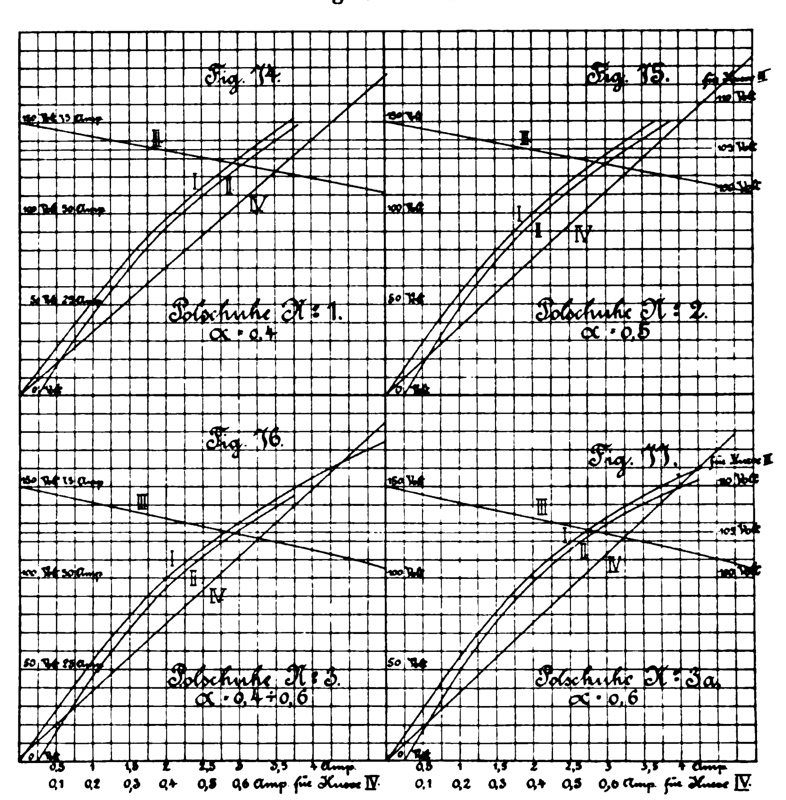
berechnet. Diese von den Feldampèrewindungen subtrahiert geben

die resultierenden Ampèrewindungen, die bei Leerlauf eine E.M.K. induzieren würden, welche gleich

$$J \sqrt{r_a^2 + x_{s1}^2} = \frac{J \cdot x_{s1}}{\sin \varphi}$$

zu setzen ist; also kann x_{s1} bestimmt werden und ist ziemlich unabhängig davon, ob φ etwas zu gross oder zu klein angenommen ist.

Fig. 74 bis 77.



Zweitens wurde sowohl ein Wechselstrom wie ein Gleichstrom durch die Armaturwicklung geschickt, während die Armatur in der Luft gelagert war, woraus x_{s1} ebenfalls bestimmt werden kann.

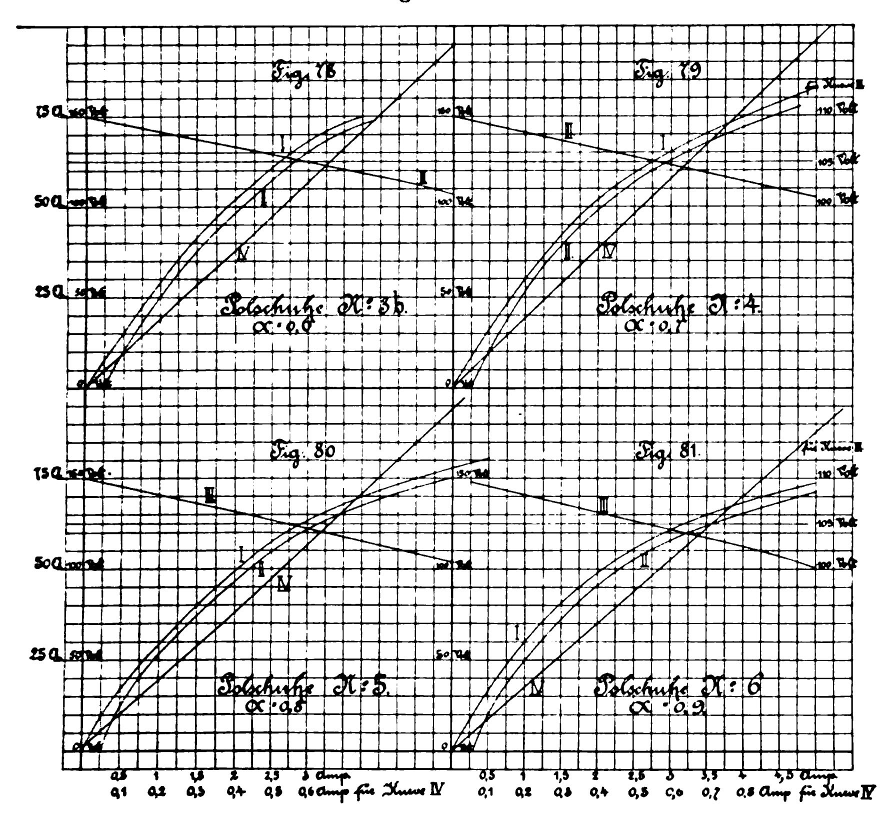
Drittens ist hier x_{s1} berechnet für den Fall, dass die Armatur in der Luft gelagert ist.

Die Wicklung ist eine Kuchenwicklung und ist in Fig. 82 in einer Ebene abgerollt dargestellt.

Für die Spulenseiten ist $q = 1$, während die Stirnverbindungen sich in zwei Teile teilen und für diese somit $q = 2$ wird.

$$p = 2; \; w = 56; \; c = 50 \sim.$$

Fig. 78 bis 81.



Für die Spulenseiten ist

$$\Sigma\, l_x \lambda_x = l \,.\, \lambda_g = l \,.\, \frac{1}{\pi}\left(0{,}5 + 2{,}3 \log \frac{2\,\tau}{S}\right),$$

$$l = 18 \text{ cm}; \; \tau = 20 \text{ cm}; \; S = 8 \text{ cm}; \; \frac{2\,\tau}{S} = 5,$$

also

$$l \,.\, \lambda_g = 12.$$

Für die Stirnverbindungen, die auf gusseisernen Endscheiben liegen, ist der Kraftlinienweg in der Luft ca. $\frac{3}{2}$ mal grösser als für

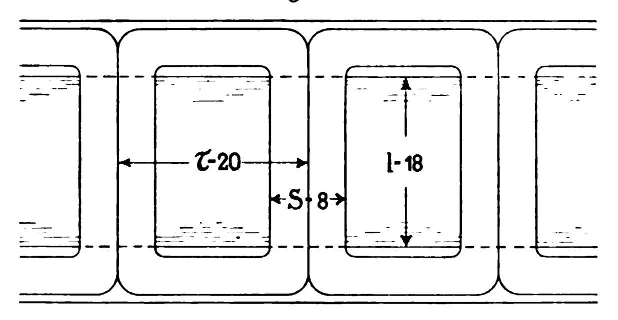
die Spulenseiten, und die Länge der Verbindungen ist ca. $\tau - \frac{S}{2}$ $= 16$ cm, also wird für diese

$$\Sigma\, l_x \lambda_x = \left(\tau - \frac{S}{2}\right) \frac{2}{3} \lambda_s = 16 \cdot \frac{2}{3\pi} \left\{ 0{,}5 + 2{,}3 \log \frac{2\,l}{\frac{1}{2} S} \right\} = 9{,}2,$$

und wir erhalten

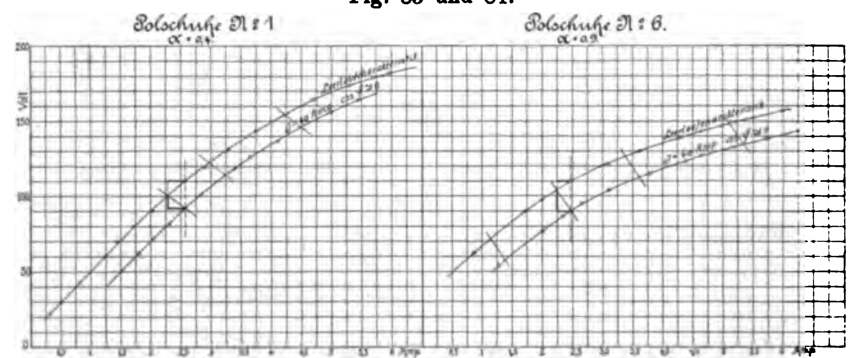
$$x_{s1} = \frac{16\, c\, w^2}{p\, 10^8} \left(12 + \frac{1}{2} \cdot 9{,}2\right) = 0{,}207\, \Omega.$$

Fig. 82.



Viertens sind für die breitesten und schmalsten Polschuhe (Nr. 6 und Nr. 1) die Belastungscharakteristiken bei $\cos\varphi \sim 0$ auf-

Fig. 83 und 84.



genommen worden und hieraus auch x_{s1} bestimmt. Dass die Kurven vollständig äquidistant sind, ist sehr leicht zu verifizieren.

In der folgenden Tabelle sind nun alle Werte von x_{s1} und das Verhältnis zwischen den aus der Kurzschlusscharakteristik ermittelten Werten von x_{s1} und demjenigen Wert x_{s1}, den man findet, wenn die

Armatur in der Luft gelagert, d. h. das Feldsystem entfernt ist, zusammengestellt.

x_{s1} experimentell . . 0,205 Ω, Armatur aus dem Feldsystem entfernt,
x_{s1} berechnet . . . . 0,207 Ω.

Polschuhe Nr.	1	2	3	4	5	6
f_w	0,88	0,91	0,92	0,925	0,93	0,925
k_0	0,73	0,725	0,701	0,665	0,631	0,585
x_{s1} (Kurzschlusscharakteristik	0,232	0,24	0,25	0,27	0,31	0,37
x_{s1} (Belastungscharakteristik	0,22	—	—	—	—	0,35
Verhältnis der x_{s1} . .	1,13	1,17	1,22	1,32	1,51	1,80

Da der Spannungsabfall bei $\cos\varphi = 1$ fast unabhängig von der Reaktanz x_a ist, so kann die äussere Charakteristik benutzt werden, um r_a zu bestimmen, wodurch man den Einfluss des Verhältnisses α auf die Wirbelstromverluste sehen kann. Man findet mit Gleichstrom gemessen $r'_a = 0{,}13^\Omega$, mit Wechselstrom gemessen für den Fall, dass die Armatur in der Luft gelagert ist, $r_a = 0{,}155^\Omega$ und aus der äusseren Charakteristik bei den

Polschuhen Nr. .	1	2	3	4	5	6
r_a	0,17	0,178	0,180	0,185	0,195	0,210
Verhältnis $\frac{r_a}{r'_a}$ . .	1,31	1,37	1,39	1,42	1,5	1,62

Beispiel 2. In Fig. 85 sind einige an den 500-Kilowatt-Drehstromgeneratoren der städtischen Zentrale in Karlsruhe aufgenommene Kurven, nämlich die Leerlaufcharakteristik, die äusseren Charakteristiken bei Belastung und bei Entlastung und die Kurzschlusscharakteristik aufgezeichnet. Alle Versuchspunkte sind durch schwarze Punkte markiert, während alle berechneten Punkte durch Kreise dargestellt sind.

Die Armaturwicklung hat $w = 429$ Windungen pro Phase; die Wicklung ist eine Einlochwicklung, und die Abmessungen der Nuten ist in Fig. 85a gegeben.

Das Verhältnis α ist gleich 0,5, woraus folgt, dass $k_0 = 0{,}8$ zu nehmen ist und

$$k_0 \,.\, m \,.\, w \,.\, J = 1030 \,.\, J.$$

Die Maschine hat 66 Erregerspulen mit je 54 Windungen, so dass die totalen Feldampèrewindungen gleich sind

$$3560\ i_e.$$

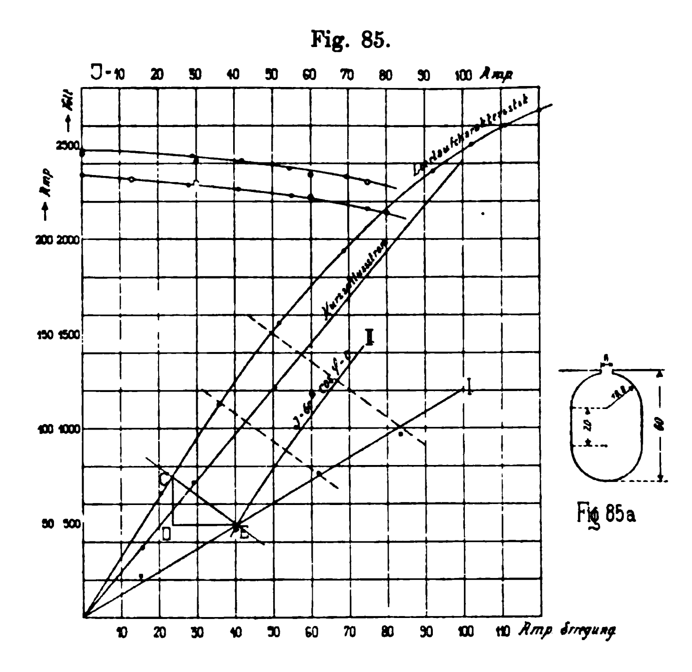
Der Ohmsche Widerstand pro Phase ist 0,38 Ohm; wir wählen nun $r_{eff} = 0,75$ Ohm. Die Armaturlänge beträgt 27 cm, die Länge der Stirnverbindungen $l_s = 65$ cm, $d_s = 5,2$ cm und die Periodenzahl $c = 50 \sim$. Mit den Nutendimensionen (Fig. 85a) und diesen Werten ergibt die Berechnung

$$x_{s1} = 5,0 \text{ Ohm}.$$

Experimentell wurde gefunden, indem in eine Phase ein Wechselstrom geschickt wurde

$$x_{s1} = 5,8 \text{ Ohm}.$$

Fig. 85.



Für die berechneten Punkte der äusseren Charakteristiken wurde deshalb

$$x_{s1} = 5,4 \text{ Ohm}$$

und

$$r_{eff} = 0,75 \quad \text{„} \quad \text{gesetzt.}$$

Aus der Kurzschlusscharakteristik hat sich für x_{s1} der Wert 4,3 Ohm ergeben. Ferner belasteten wir die eine Maschine mit der Armaturwicklung einer zweiten, stillstehenden Maschine, die als vollständig induktive Belastung anzusehen ist. Da die Reaktanz der Belastung (Armaturwicklung) nicht variiert werden konnte, erhielten wir bei den verschiedenen Erregungen verschiedene Stromstärken; die Klemmenspannung ist in der Kurve I Fig. 85 als Funktion der Er-

regung aufgetragen. Aus der Kurve I ist die Kurve II wie folgt abgeleitet. Für den Punkt der Kurve I, der der Ankerstromstärke $J = 60$ Ampère entspricht, ist das Dreieck CDE konstruiert worden, und es sind durch alle Versuchspunkte Parallelen zu CE gezogen. Die auf diesen Parallelen zwischen der Leerlaufcharakteristik und der Kurve I abgeschnittenen Strecken entsprechen anderen Strömen und sind deswegen auf den Strom von 60 Ampère reduziert worden, wodurch die Kurve II entstand, die nichts anderes ist als die Belastungscharakteristik für $J = 60$ Ampère bei $\cos\varphi = 0$. Wie aus der Figur zu sehen, ist Kurve II vollständig mit der Leerlaufcharakteristik äquidistant. Der aus dieser Kurve ermittelte Wert für x_{s1} ist gleich 4,2 Ohm, also fast der gleiche Wert, der aus dem Kurzschlussversuch ermittelt wurde.

Die beiden letzten Werte für x_{s1} sind etwas kleiner als die durch Rechnung und durch Hineinschicken eines Wechselstromes in eine Phase der stillstehenden Maschine gefundenen Werte. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Reaktanz x_{s1} kleiner ist bei $\cos\varphi = 0$ als bei $\cos\varphi = 1$; denn bei $\cos\varphi = 0$ ist der Strom ein Maximum, wenn die Windungen einen Pol umschlingen, wodurch derjenige Teil des Streuflusses, der an den Stellen aus der Armatur heraustreten würde, die dem Pole gegenüberliegen, jetzt zu dem entmagnetisierenden Flusse gehört und deswegen nicht gleichzeitig als Streufluss berücksichtigt werden kann. Setzt man deshalb bei $\cos\varphi = 0$ und $q = 1$

$$\lambda_k = \frac{2,3}{\pi} \log \frac{\pi(\tau - b)}{4 r_1}$$

und

$$\lambda_s = \frac{2,3}{\pi}\left[\log\left(\frac{l_s}{d_s}\right) - 0,4\right],$$

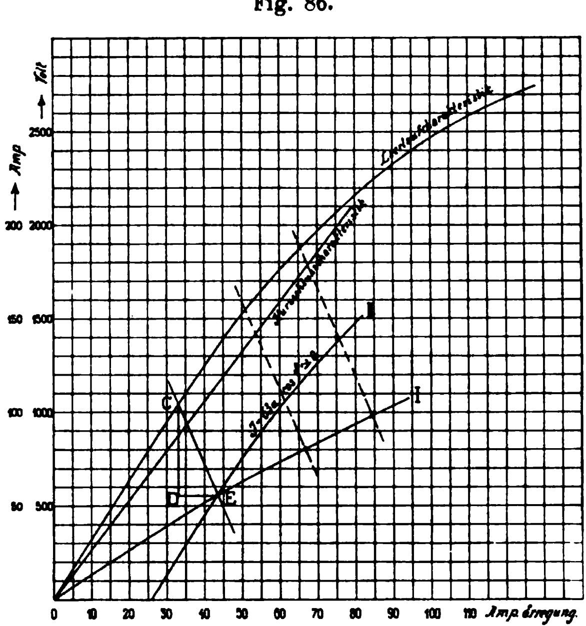
so erhält man richtigere Werte für x_{s1} bei $\cos\varphi = 0$. Hier findet man $x_{s1} = 4,0$ Ohm.

Bei $\cos\varphi = 1$ dagegen, wo der Strom in einem Leiter ein Maximum ist, wenn der Leiter unter der Mitte des Poles liegt, kann x_{s1} wenigstens gleich dem gerechneten Werte oder gleich dem Werte genommen werden, den man findet, wenn die Armatur in der Luft ist. Das quermagnetisierende Feld ist nämlich hier so gross und so deformiert, dass man es kaum genug in E_{sr} berücksichtigt hat. Diese Variation von x_{s1} mit $\cos\varphi$ ist somit erklärlich und ist natürlich unangenehm, weil sie die Bestimmung von x_{s1} etwas unsicher macht, aber der Fehler, den man hierdurch begehen kann, ist doch nicht gross, weil $J x_{s1}$ selten die Hälfte von $J x_a$ ausmachen wird.

In Fig. 86 ist die Leerlaufcharakteristik derselben Maschine, die

Kurzschlusscharakteristik und die Kurven I und II für den Fall, dass nur zwei Phasen belastet sind, aufgezeichnet; der Generator arbeitet also hier als Einphasenmaschine mit Zweilochwicklung $\left(\frac{S}{\tau} = \frac{1}{3}\right)$ und k_0 ist gleich 0,77. — Durch Hineinschicken eines Wechselstromes in die zwei Phasen wurde x_{s1} für die Lage der Spulenseiten der zwei Phasen in der neutralen Zone zu 6,3 Ohm und für die Lage derselben

Fig. 86.



unter der Mitte des Polschuhes zu 8,8 Ohm gefunden, also Mittelwert 7,55 Ohm, und der Faktor, womit x_{s1} multipliziert werden soll, um das zweite Drehfeld der doppelten Periodenzahl zu berücksichtigen, wird gleich

$$\frac{\text{Mittel}}{2 \,.\, \text{Minimum}} + \frac{1}{2} = \frac{7{,}55}{2 \,.\, 6{,}3} + 0{,}5 = 1{,}1.$$

Wenn die Maschine als Einphasenmaschine arbeitet, soll

$$x_{s1} = 1{,}1 \,.\, 6{,}3 = 6{,}95 \text{ Ohm}$$

gesetzt werden. Aus der Kurzschlusscharakteristik findet man x_{s1} gleich 6,2 Ohm und aus der Belastungscharakteristik bei cos $\varphi = 0$ (Kurve II, Fig. 86) gleich 7,0 Ohm.

Um den Spannungsabfall bei induktiver Belastung zu bestimmen,

wurden zwei parallel geschaltete Maschinen durch einen Wasserwiderstand belastet und die untersuchte Maschine stärker bezw. schwächer erregt als die andere; dadurch erhielten wir folgende Punkte, die mit

Fig. 87.

den für dieselben Verhältnissen berechneten Werten zum Vergleich zusammengestellt sind.

	Erreger i_e	E_p	J	cos φ	$E_{k\,exper.}$	$E_{k\,berech.}$
Phasen-	94,9	2400	23	0,66	2210	2200
verzögerung	103	2510	50	0,87	2220	2235
Phasen-	79,6	2100	49	0,84	2310	2290
voreilung	74,5	2050	49	0,735	2340	2325

Beispiel 3. In Fig. 87 sind die Leerlaufcharakteristik, die Kurzschlusscharakteristiken und einige Belastungscharakteristiken für

die 1500 Kilowatt-Drehstromgeneratoren in Paderno dargestellt; diese Maschinen leisten normal 64,5 Ampère bei 13 500 Volt Klemmenspannung und $\cos \varphi = 1$. Die Armaturwicklung hat $w = 420$ Windungen pro Phase; die Wicklung ist eine Einlochwicklung; jedes Loch ist geschlossen und hat einen Durchmesser von 6,5 cm. Das Verhältnis α ist gleich 0,55, woraus folgt, dass $k_o = 0{,}79$ zu nehmen ist und

$$k_o \,.\, m \,.\, w \,.\, J = 1000 \,.\, J.$$

Die Maschine hat 28 Erregerspulen mit je 73 Windungen, so dass die totalen Feldampèrewindungen gleich sind

$$2040\ i_e.$$

Der Ohmsche Widerstand pro Phase ist ca. 0,9 Ohm; wir wählen nun $r_{eff} = 1{,}6$ Ohm. Die Armaturlänge beträgt 55 cm, die Länge der Stirnverbindungen $l_s = 95$ cm, $d_s = 4{,}5$ cm und die Periodenzahl $c = 42 \sim$.

Aus diesen Werten folgt für die Reaktanz

$$x_{s1} = 16{,}7 \text{ Ohm},$$

die etwas zu klein ausgefallen ist, weil die Spulen die Nuten nicht ganz ausfüllen. Ferner wird

$$E'_s = \frac{2 \,.\, 42 \,.\, 420 \,.\, 0{,}1 \,.\, 42}{10^3} = 148 \text{ Volt}.$$

Alle Versuchspunkte sind durch schwarze Punkte markiert, während die fünf berechneten Punkte der drei Belastungscharakteristiken durch Kreise angegeben sind.

Aus der Kurzschlusscharakteristik erhielten wir

$$x_{s1} = 15{,}25 \text{ Ohm},$$

und wird die Maschine als Einphasengenerator kurzgeschlossen, so bekommt man für $k_o = 0{,}75$

$$x_{s1} = 21{,}5 \text{ Ohm},$$

während man durch Rechnung in diesem Falle

$$x_{s1} = 18{,}5 \text{ Ohm}$$

erhält. Der Faktor, der mit x_{s1} multipliziert werden soll, um das zweite Drehfeld bei Einphasengeneratoren zu berücksichtigen, wird hier 1,16.



Die industrielle Elektrolyse des Wassers
und die Verwendungsgebiete von Wasserstoff und Sauerstoff.

Von

M. U. Schoop,

Ingenieur für Elektrotechnik, Köln-Lindenthal.

Mit 22 Abbildungen.

Die vorliegende Arbeit möge einesteils als Monographie derjenigen elektrolytischen Wasserzersetzungsapparate, die in der Praxis eine gewisse Bedeutung erlangt haben, andererseits als eine Zusammenstellung der vorgeschlagenen oder patentierten Konstruktionen, sowie der verschiedenen Verwendungsgebiete der Zersetzungsprodukte des Wassers, Sauerstoff und Wasserstoff, aufgefasst werden.

Die historische Entwicklung und Theorie der Elektrolyse des Wassers wird, der mir gestellten Aufgabe entsprechend, nur flüchtig gestreift werden, hingegen schien mir eine eingehendere Besprechung der in Frage kommenden Elektrolyte von Wichtigkeit.

In der Litteratur ist über die elektrolytische Wasserzersetzung für industrielle Zwecke ausserordentlich wenig bekannt geworden, was darauf zurückgeführt werden mag, dass diese elektrochemische Industrie noch ein Kind der Neuzeit ist, und ausserdem die meisten Betriebe über ihr Schalten und Walten einen geheimnisvollen Schleier decken. Ich habe mich trotzdem bemüht, möglichst authentische Angaben über bestehende Anlagen, Gestehungskosten u. dergl. zu bringen, wobei ich teils durch mir freundlich gemachte Mitteilungen privater Natur, für die ich an dieser Stelle bestens danke, teils durch eigene mehrjährige Erfahrungen aus der Praxis unterstützt wurde.

Einige Aufsätze über die Elektrolyse des Wassers im Grossen, sowie über die Bleilöttechnik mit Knallgas, habe ich seiner Zeit

in der Zeitschrift für Elektrotechnik (Wien), sowie in der Industrie électrique (Paris) veröffentlicht und fragmentarisch für diesen Vortrag verwertet.

Für die Durchsicht der Korrekturen spreche ich Herrn Dr. Lüpke-Berlin an dieser Stelle nochmals meinen besten Dank aus. Der Verf.

I. Abschnitt.

Historisches und Theoretisches.

Die elektrolytische Wasserzersetzung ist wohl eines der ältesten elektrochemischen Experimente. Es würde den Rahmen der vorliegenden Aufgabe überschreiten, wenn ich die historische Entwicklung der Elektrolyse des Wassers, welche in Deutschland vor rund 100 Jahren durch Ritter in Jena unabhängig von Wollaston und Nicholson entdeckt wurde, beschreiben wollte. Es möge nur beiläufig erwähnt werden, dass als Elektrodenmaterial Gold oder Platin, und als Zersetzungsflüssigkeit angesäuertes Wasser verwendet wurden; zum Blei griff man erst viel später. Diese Apparate waren die Vorgänger der heute noch vielfach in Laboratorien für Strommengenbestimmungen gebrauchten Knallgasvoltameter.

Gewöhnlich wird bei dem Wasser- oder Knallgasvoltameter das Volumen des entwickelten Knallgases, welches in einer geteilten Röhre aufgefangen wird, gemessen (Volumenvoltameter); die Zersetzungsprodukte, nämlich Wasserstoff und Sauerstoff, können auch getrennt aufgefangen werden, wie dies Fig. 1 zeigt.

Bei schwächeren Strömen ist nur das entwickelte Wasserstoffgas volumetrisch zu messen und durch Multiplikation mit $^3/_2$ das äquivalente Knallgasvolumen zu berechnen, weil der Sauerstoff bei stattfindender Ozonbildung teilweise vom Wasser absorbiert wird. Für Ströme bis zu 30 Ampère hat Kohlrausch in der Elektrotechnischen Zeitung 1885, S. 190 ein Wasservoltameter beschrieben, dessen Handhabung sehr bequem ist.

Anstatt das Gas zu messen, bestimmt man wohl auch das Gewicht des zersetzten Wassers durch Wägung vor und nach dem Versuche. Zum Unterschied von den eben skizzierten Volumenvoltameter nennt man diese Zersetzungsapparate Gewichtsvoltameter.

Gasausbeute.

Die Umrechnung der in einem Versuche erhaltenen Kubikcentimeter Knallgas auf Stromstärke in Ampère geschieht nach folgender Regel[1]:

Die Zahl der in 1 Sekunde ausgeschiedenen Kubikcentimeter Knallgas wird mit 5 multipliziert, um die Stromstärke in Ampère zu erhalten.

Hiebei sind die Gasvolumina auf 0° und 760 mm Barometerstand zu reduzieren.

1 Coul. entspricht 0,000010384 g = 0,000116 cbcm H
1 Amp.-Std. „ 0,03736 „ = 0,4176 „ „

In derselben Zeit wird dem Volumen nach halb so viel Sauerstoff und dem Gewichte nach achtmal so viel Sauerstoff entwickelt als Wasserstoff. Dieses Verhältnis wird jedoch nie erreicht, selbst nicht bei Laboratoriumsversuchen, da immer ein kleiner Fehlbetrag an Sauerstoff vorhanden ist. Wahrscheinlich muss dieser Fehlbetrag auf Rechnung von Nebenreaktionen gesetzt werden. Nach Faraday wäre hieran die Ozonbildung, nach Meidinger die Wasserstoffsuperoxydbildung schuld.

Wie dem auch sei, es steht fest, dass die Abweichung von dem theoretischen Verhältnis bei sauren und alkalischen Elektrolyten in der Praxis sehr gering ist.

Fig. 1.

Knallgasvoltameter nach Hoffmann.

Zersetzung des Wassers.

Die Frage, ob die Zersetzung des Wassers primär oder sekundär erfolgt, ist viel diskutiert worden; zufolge der neueren Anschauung wäre das Wasser bei der Stromleitung wässeriger Lösungen der Elektrolyte unter gewöhnlichen Umständen primär nicht beteiligt. Nach den klassischen Untersuchungen Kohlrauschs ist Wasser in absolut reinem Zustande überhaupt als Nichtelektrolyt aufzufassen.

---

[1]) Nach: Hilfsbuch f. d. El. von Grawinkel und Strecker. Berlin 1898.

Nun sind die Elektrolyte dadurch definiert, dass sie den elektrischen Strom leiten, indem sie chemisch verändert, bezw. in gewisse Bestandteile zerlegt werden; mithin ist der oft gebrauchte Ausdruck, die dem Wasser zugesetzte Schwefelsäure diene lediglich dazu, das Wasser leitend zu machen, dahin zu verstehen, dass die Wasserstoffionen der Säure an der Kathode entladen werden, und den zur Anode geführten SO_4-Ionen aus dem Wasser neue Wasserstoffionen geschaffen werden, wobei der freie Sauerstoff entweicht.

Man könnte dem Wasser auch eine andere Sauerstoffsäure oder auch ein Alkalisalz einer solchen zusetzen, wenn das Wasser leitend gemacht werden soll. Auf die Anwesenheit geringer Mengen gelöster Salze ist es zurückzuführen, dass das in der Natur vorkommende Wasser immer eine gewisse Leitfähigkeit besitzt.

Als minimale Zersetzungsspannung von verdünnter H_2SO_4 zwischen Bleielektroden gilt der Wert 1,7 Volt [1]).

Elektrolyte, deren Leitfähigkeiten und sonstige Eigenschaften.

Darüber, ob dem sauren oder alkalischen Elektrolyt bei der Wasserzersetzung der Vorzug zu geben sei, sind die Meinungen geteilt. In den bestehenden industriellen Wasserzersetzungsanlagen werden beide Elektrolyte angewendet. Als saurer Elektrolyt kann nur reine verdünnte Schwefelsäure von maximaler Leitfähigkeit in Frage kommen mit Hart- oder Weichblei als Elektrodenmaterial. Nun haftet Elektrolyseuren mit Bleielektroden und saurem Elektrolyten der Nachteil an, dass sie beim Stromdurchgang eine Gegen-E.M.K. erzeugen, deren numerischer Wert etwa der Klemmenspannung eines unter Ladung stehenden Akkumulators entspricht und als Funktion der Stromdichte zwischen 2,5 und 3,0 Volt schwankt. Eine derartige Wasserzersetzungsanlage kann somit als Plantébatterie betrachtet werden, deren Kapazität allerdings infolge der immer sich gleich bleibenden Stromrichtung auch nach jahrelanger Betriebsdauer sehr klein bleibt. Aus dem nämlichen Grunde dürften auch die Elektrolyseure mit Bleielektroden und Schwefelsäure den Apparaten mit Stahl- bezw. Eisenelektroden in alkalischer Flüssigkeit hinsichtlich der Lebensdauer überlegen sein.

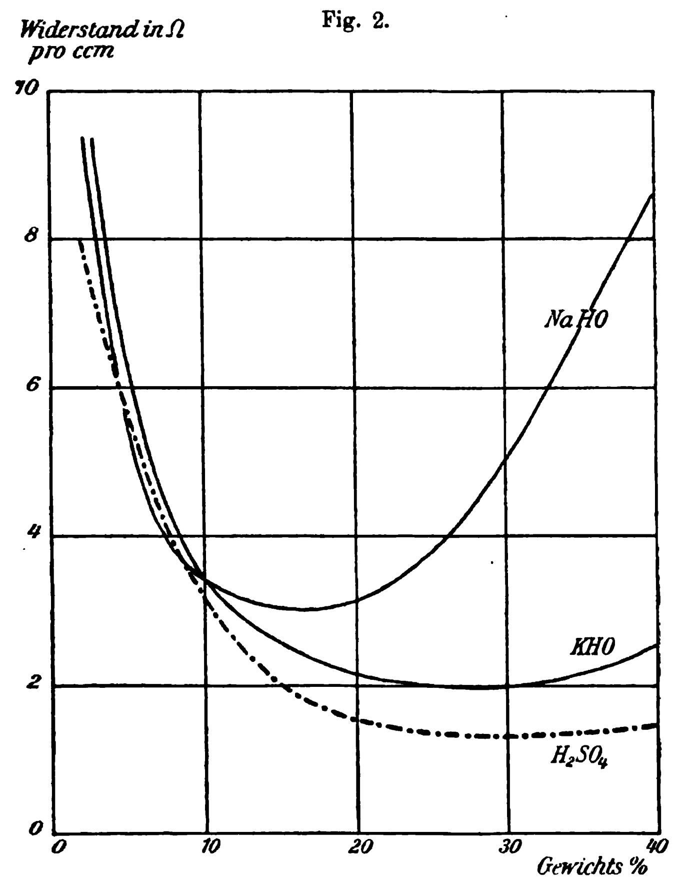
Ein Vorteil des Bleies als Elektrodenmaterial gegenüber Eisen oder Stahl ist ferner die grosse Bearbeitungsfähigkeit und seine Eigenschaft, den ursprünglichen Materialwert nicht einzubüssen, während-

[1]) Zeitschrift für Elektrochemie 6, Heft 37—39.

dem Eisen verwittert und nach Jahren als Material nahezu wertlos geworden ist.

Ueber die Leitfähigkeit der in Betracht kommenden Elektrolyte gibt Fig. 2 Aufschluss. Man sieht, dass die grösste Leitfähigkeit der 30%igen Schwefelsäurelösung (entsprechend der Dichte von 1,235)

Fig. 2.



Graphische Darstellung der Widerstände von alkalischen Laugen und Schwefelsäurelösung.

zukommt, während die Maxima der Leitfähigkeiten für Aetznatron- bezw. Aetzkalilösungen (NaOH, KOH) Gehalten von 17 % bezw. 28 % entsprechen.

Hinsichtlich der Leitfähigheit der verdünnten Schwefelsäure von der Dichte 1,235 (= 30 %) ist noch darauf hinzuweisen, dass die Temperatur den Widerstand in hohem Masse beeinflusst. Wenn man die Temperaturen als Abscissen, die Leitfähigkeiten als Ordinaten

aufträgt, dann bilden die Kurven, welche für die verschiedenen Konzentrationen von Schwefelsäure konstruiert werden können, Parabeln, welche je nach der Konzentration gegen die Abscissenachse schwach konkav oder konvex sind. Für 30%ige Schwefelsäure ist die Zunahme des Leitvermögens annähernd proportional der Temperatur und zwar beträgt die Leitfähigkeit bei 60 ° C. ziemlich genau das Doppelte, wie bei 10 ° C.

Für alkalische Lösungen gelten ähnliche Beziehungen; es ist demnach ersichtlich, dass man auf alle Fälle Interesse daran hat, die Zersetzungsflüssigkeiten auf einer gewissen Temperatur zu halten, z. B. durch die Stromarbeit oder durch künstliche Wärmezuführung (System Schuckert).

Die Innehaltung einer gewissen Temperatur ist für alkalische Elektrolyte nach Angaben von Garuti auch deshalb von grösster Wichtigkeit, weil bei Temperaturen unter 10 ° C. in den unteren, dichteren Flüssigkeitsschichten Krystallbildung auftritt und die Entstehung von Kohlensäureanhydrid bezw. kohlensaurem Natrium begünstigt wird.

Der Einfluss des Druckes auf die Elektrolyse ist gleich Null.

Preise verschiedener Elektrolyte.

Die Aetzkali- bezw. Aetznatronlösungen sind unvergleichlich teurer als verdünnte Schwefelsäure. Nach einer Preisliste der chemischen Fabrik List bei Hannover kosten z. B.

100 kg technisch reine	Kalilauge (34 %)	28.— M.
100 „ „ „	Natronlauge (32 %) . . .	17.50 „
100 „ chemisch „	Schwefelsäure (30 %) . . .	7.— „

Unter der Voraussetzung, dass die obige, technisch reine Kalilauge genügend rein ist, um für den besagten Zweck verwendet werden zu können, käme somit die Schwefelsäurefüllung einer Anlage rund viermal billiger als eine Füllung mit Kalilauge. Die Praktiker stimmen alle darin überein, dass ein hoher Reinheitsgrad des verwendeten Alkali wünschenswert ist, da sonst in den Zersetzern ungünstige Nebenreaktionen auftreten. Natronlauge ist bedeutend billiger als Kalilauge, jedoch ist die Leitfähigkeit der Natronlauge erheblich geringer.

Konzentrationsunterschiede.

Um die Gase unter einem gewissen Drucke, der je nach der Verwendungsart der Gase zwischen 0,3 und 1 m Wassersäule schwankt,

auffangen zu können, besitzen die meisten Elektrolyseure eine Höhe, welche genügt, in der Flüssigkeit verschiedene Konzentrationsschichten zu veranlassen. Diesem Punkt ist Beachtung zu schenken, da die Dichteunterschiede unter Umständen sehr beträchtlich sein können, und, wie aus den Kurven der Fig. 2 hervorgeht, entsprechend die Widerstände der Apparate beeinflussen, anderenteils aber, besonders bei alkalischem Elektrolyt, Sparsamkeit geboten ist. Für den Betrieb von Gasometern, an welche unmittelbar die Kompressorenanlage angeschlossen ist, gilt ein Druck von 25—30 cm Wassersäule für ausreichend.

Passiver Zustand des Eisens.

Bekanntlich geht Eisen in alkalischer Flüssigkeit und unter der Einwirkung der Elektrolyse in den sogenannten „passiven Zustand" über. Nach Untersuchungen jüngster Zeit [1]) scheint jedoch die Passivität des Eisens eine nur bedingte zu sein, da Eisensäurebildung stattfindet, die einesteils von der Elektrolyttemperatur, anderenteils von der Natur des Elektrolyten und des Eisens beeinflusst wird. Dies erklärt auch, warum in einzelnen industriellen Wasserzersetzungsanlagen über die verhältnismässig geringe Haltbarkeit der Eisenelektroden geklagt wird. Im allgemeinen ergaben die Versuche von Pick und Haber, dass die Eisensäurebildung in Natronlauge stärker ist, als in Kalilauge.

Da alkalische Laugen begierig Kohlendioxyd aus der atmosphärischen Luft absorbieren, wodurch Natriumcarbonat entsteht und die Leitfähigkeit der Flüssigkeit zurückgeht, wird auf den Elektrolyten eine Schicht Paraffinöl gegeben, welches, zum Unterschied von anderen Oelen, weder teuer noch feuergefährlich ist und durch die Lauge nicht verseift wird.

II. Abschnitt.

Elektrolyseure für die industrielle Darstellung von Wasserstoff und Sauerstoff.

Ein Blick in die einschlägige Patentlitteratur zeigt, dass es nicht an Vorschlägen und Konstruktionen von Elektrolyseuren fehlt,

---

[1]) Vergl. Zeitschrift für Elektrochemie 1901, Heft 51: „Ueber die elektrochemische Bildung eisensaurer Alkalisalze" von Pick und F. Haber.

welche die elektrolytische Gewinnung von Wasserstoff und Sauerstoff ermöglichen sollen.

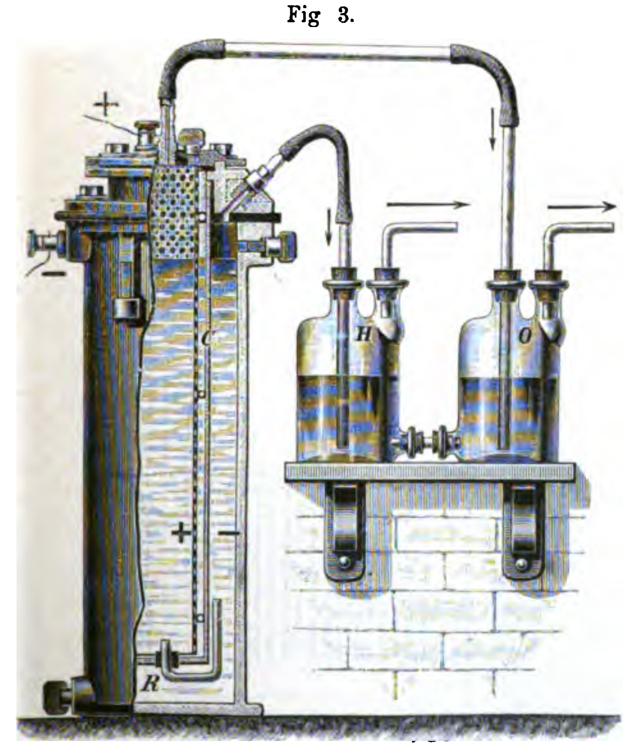
Die Anzahl der wirklich ausgeführten Systeme, die in der Praxis zu etwaiger Bedeutung gelangt sind, ist jedoch eine vergleichsweise sehr geringe. Ich gebe von diesen Systemen folgende mehr oder weniger vollständige Zusammenstellung:

Erfinder	Veröffentlichung	Jahr der Veröffentlichung	Elektrolyt	Charakteristik des Apparates
D'Arsonval	Hilfsbuch von Grawinkel und Strecker	1885	Kaust. Kali	Ein durchlöcherter, mit Baumwolle oder Leinwand umhüllter Eisencylinder steht in einem Eisengefäss; die beiden Eisengefässe bilden die Elektroden.
Latschinoff	D.R.P. 51998	1888 20. XI.	Saure Lösung	Elektroden: Blei und Kohle oder eiserne Elektroden; Diaphragmen aus Asbestgewebe oder aus Pergament.
Renard	Prospekt von E. Ducretet-Paris, rue Claude-Bernard 75	1895	Alkalische Lösung	Als Elektrode dienender Behälter aus Gusseisen; Gegenelektrode perforiertes Eisen- oder Nickelblech.
Dennard	D.R.P. 58282	1891	Alkalische Lösung	Viel Aehnlichkeit mit dem vorigen.
Siemens, Broth.	Engl. Patent 11973	1893	Alkalische Lösung	Diaphragma aus Eisendrahtgewebe.
Garuti	D.R.P. 83110	1895	Saure oder alkalische Lösung	Eine Reihe von nach unten offenen Zellen, durch undurchlässige Diaphragmen gebildet, bilden ein zusammengehöriges, aus dem Bade abhebbares Ganzes.
Schuckert & Co. Nürnberg	Deutsche Chemiker-Zeitung 1898, Nr. 14	Ausgeführte Anlage in Hanau 1896	Alkalische Lösung	Unporöse Scheidewände; jede einzelne Zelle bildet mit der Elektrode ein bequem abhebbares Ganzes. Die Elektrolyseure werden vermittelst Dampfschlangen erwärmt.
Schmidt-Zürich	Zeitschrift für Elektrochemie Heft 20	1898	Alkalische Lösung	Der Apparat besitzt eine sehr kompendiöse Form und gleicht dem Aussehen nach einer Filterpresse.
M. U. Schoop-Köln	Oesterr. Patent 1285 D.R.G.M. 141049	1889 1900	Saure oder alkalische Lösung	Die Apparate haben runde Form und enthalten röhrenförmige Elektroden aus Blei oder Eisen.

Konstruktion Renard.

Ein Elektrolyseur für Wasserzersetzung, der vielfach in französischen Laboratorien angetroffen wird, ursprünglich jedoch für aëronautische Zwecke hergestellt wurde, ist der Apparat von Renard[1]). Die konstruktive Anordnung geht aus Fig. 3 hervor. Der äussere

Fig 3.



Wasserzersetzungsapparat nach Renard.

Behälter besteht aus Gusseisen und dient als negative Elektrode (—). Ein poröser Cylinder C aus Asbestgeflecht umschliesst die positive, ebenfalls cylinderförmige Elektrode (+) aus Eisen- oder Nickelblech. Durch ein im Boden des Diaphragmencylinders angebrachtes, rechtwinklig gebogenes Rohr R kommunizieren das äussere und das innere Gefäss.

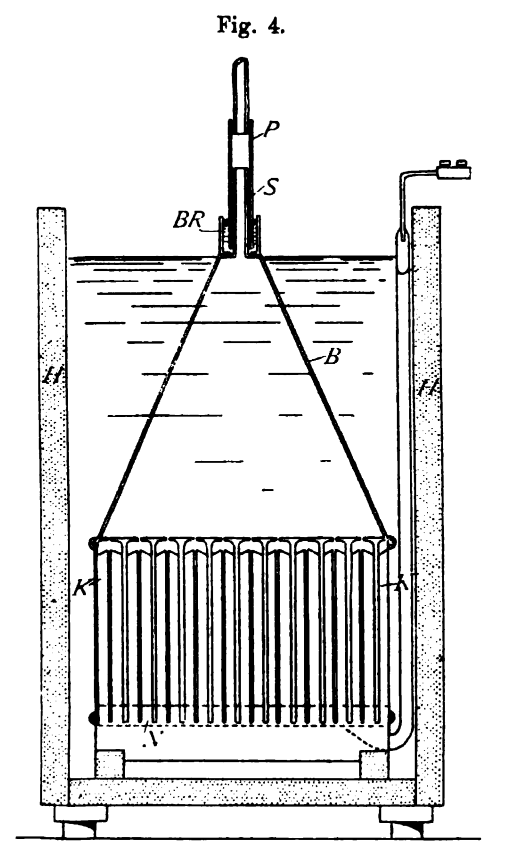
---

[1]) Käuflich zu haben unter dem Namen: Voltamètre à grand débit bei E. Ducretet-Paris.

„Die Zersetzungsflüssigkeit ist eine Aetznatronlösung mit grösster Leitungsfähigkeit (1000 g Wasser auf 150 g Aetznatron).

„Bevor die Gase in die Gasometer weitergeleitet werden, durchströmen sie hydraulische Druckausgleicher. Mit einem Strom von 25 bis 30 Ampère erzielt man eine Ausbeute von 12 l Wasserstoff

Fig. 4.



Querschnitt durch den Wasserzersetzungsapparat Garuti.

und 6 l Sauerstoff pro Stunde, wobei die Klemmenspannung etwa 3,5 Volt beträgt. Laut Prospekt soll das Diaphragma auch nach längerer Betriebsdauer jegliche Gasvermischung ausschliessen."

System Garuti.

Das System Garuti ist wohl das heute am meisten verbreitete; nach diesem System gebaute Anlagen finden sich in Tivoli bei Rom,



Fig. 5.

Wasserzersetzungsanlage Brüssel, System Garuti.

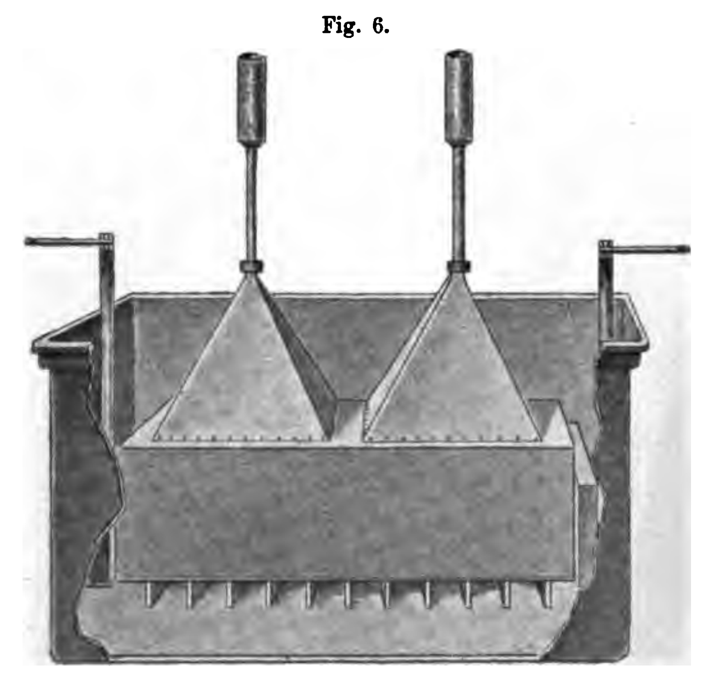
Luzern (Schweiz) und Brüssel; eine vierte Anlage ist in Paris im Entstehen begriffen.

Die Anzahl der Zersetzungsapparate der Anlage in Tivoli be-

trägt 51, in drei Reihen parallel geschaltet, von denen jede 400 bis 450 Ampère bei 45 bis 50 Volt verbraucht. Die Einrichtung der Apparate ist folgende:

Ein mit Bleiblech ausgefütterter Holzkasten H (Fig. 4) enthält im Innern einen rechtwinkligen Bleikasten N ohne Deckel, mit der Oeffnung nach unten. Das Kasteninnere ist durch dünne, etwa 2 mm starke Metalldiaphragmen in mehrere Abteilungen oder Zellen von parallelepipedischer Form geteilt. In diese Zellen ragen

Fig. 6.



System Garuti.

von unten her die aus Bleiblech bestehenden Anoden und Kathoden, die von dem Apparat durch Kämme KK aus Holz oder Ebonit isoliert sind.

Zwei parallele Kammern B über dem oberen Teile des Apparates dienen dazu, vermittelst kleiner Verbindungslöcher die an den Elektroden entwickelten Gase aufzunehmen. Diese Kammern erfüllen den doppelten Zweck, das aus den Zellen kommende Gas aufzuspeichern und sodann den Gasen jenen Druck zu geben, wie er für die verschiedenen Verwendungszwecke nötig ist. In der Praxis empfiehlt es sich jedoch niemals, das Gas aus den Elektrolyseuren direkt,

d. h. ohne Einschaltung eines Gasometers, an den Bestimmungsort zu leiten.

Die in den erwähnten Kammern B gesammelten Gase werden vermittelst eines Bleirohres S zu den Hauptröhren geleitet; das Bleirohr ist von einem Porzellanrohr P umgeben, welches länger als das Bleirohr ist, um die Bäder von der Gasleitung elektrisch zu trennen. BR endlich ist ein das Porzellanrohr umfassendes Bleirohr, durch das

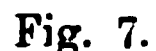
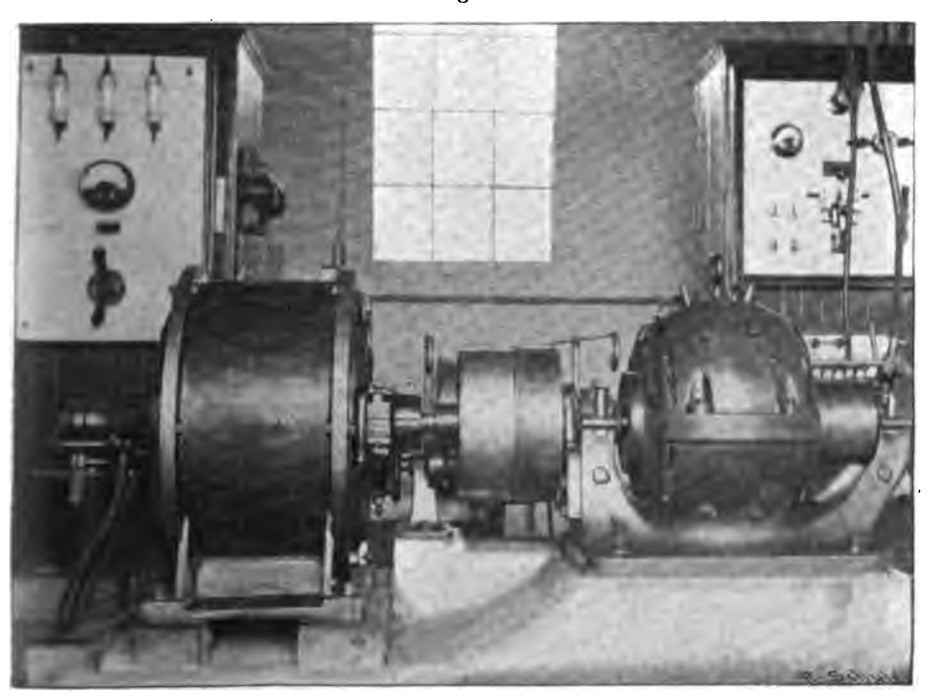


Fig. 7.



Umformerstation des Sauerstoff- und Wasserstoffwerkes Luzern.
Links Motor, rechts Generator.

ein hermetischer Abschluss erzielt wird, sobald der entstandene Hohlraum mit Wasser gefüllt wird.

Eine Vermischung der Gase soll vorkommen können, wenn die Stromdichte über das Normale ansteigt; für diesen Fall sind Sicherheitsvorrichtungen vorgesehen, die S. 132 besprochen werden.

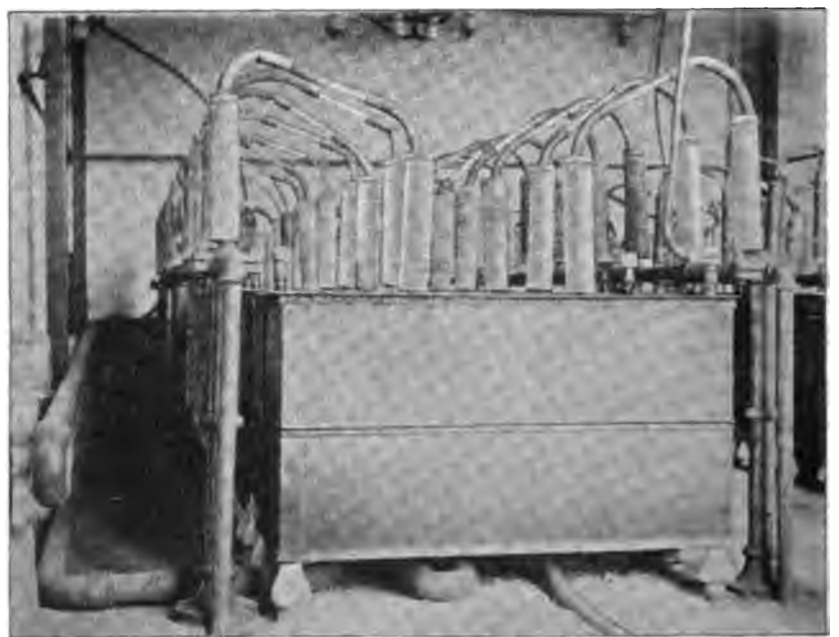
Als Konstruktionsmaterial wird an Stelle des Bleies mit verdünnter Schwefelsäure als Elektrolyt auch Eisen mit bestleitender Natron- oder Kalilauge gebraucht. Nach den bisher gewonnenen praktischen Erfahrungen ist jedoch der Verschleiss der Elektroden ein

stärkerer als bei Benützung von Bleielektroden, besonders wenn die verwendeten Alkalien nicht sehr rein sind.

Fig. 6[1]) zeigt einen Elektrolyseur Garuti, an welchem die vordere Gefässwand behufs besserer Veranschaulichung entfernt worden ist. Die Stromzuleitungen sind in der Diagonale des Kastens angebracht. Unter dem eigentlichen Entwicklergefäss mit den Gaskaminen kommen die Isolierkämme zum Vorschein.

Fig. 8.





Elektrolyseurraum des Sauerstoff- und Wasserstoffwerkes Luzern.

Eine nach dem Garutischen System erbaute grössere Anlage ist das Sauerstoff- und Wasserstoffwerk Luzern, von dem die Fig. 7, 8, 9 Abbildungen zeigen und über welches ich folgende Daten mitzuteilen in der Lage bin:

Der im Elektrizitätswerk Rathhausen erzeugte Dreiphasenwechselstrom von 1500 Volt wird durch ein Umformeraggregat (Fig. 7) auf 75 Volt Gleichstrom heruntertransformiert. Es sind 16 grosse und 32 kleinere parallel geschaltete Zersetzungsbäder zur Aufstellung ge-

[1]) Entnommen der Brochüre: Elettrolisi dell' Acqua. Società industriale Garuti e Pompili, Tivoli.

langt, mit denen in 24 Stunden ca. 50 cbm Sauerstoff und 100 cbm Wasserstoff hergestellt werden können, die behufs Kompression in Gasometer von 60 bezw. 120 cbm geleitet werden. Zwei Kompressoren verdichten in der Stunde zusammen 44 cbm Gas. Absatz finden die in Luzern dargestellten Gase hauptsächlich für die Aëronautik, für technische und therapeutische Zwecke.

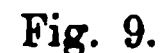
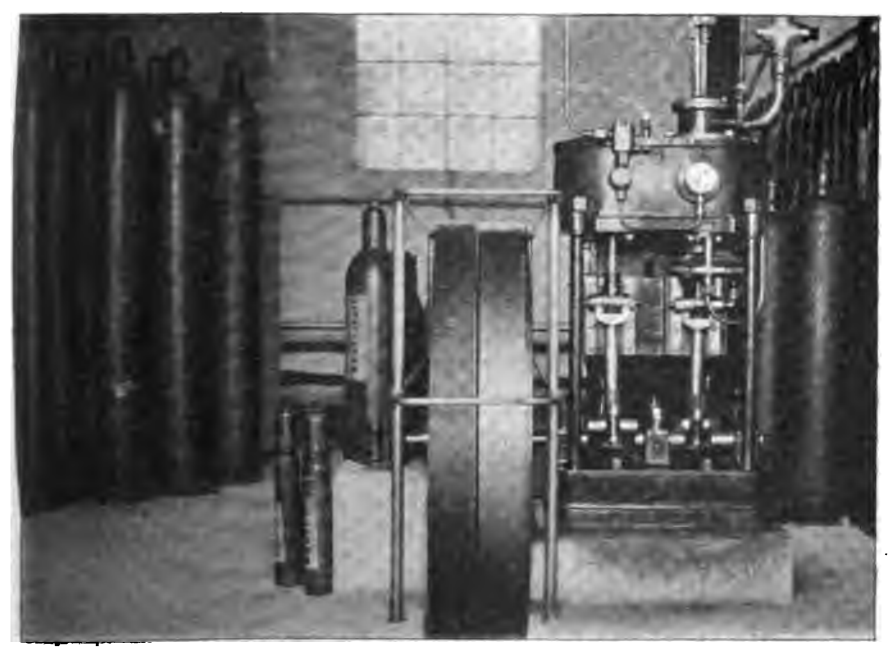


Fig. 9.



Sauerstoffkompressor des Sauerstoff- und Wasserstoffwerkes Luzern.
Der Kompressor ist von Thirion-Paris geliefert und verdichtet bei einem Kraftverbrauch von $2\frac{1}{2}$ PS 8 cbm Sauerstoff pro Stunde (150 Atmosphären).

System Schmidt.

Der Schmidtsche Apparat hat grosse Aehnlichkeit mit einer Filterpresse. Die einzelnen doppelpoligen Elektroden aus Eisenblech sind hintereinander geschaltet; am Rande gummierte Asbesttücher dienen als Isolationen und als Dichtungen, sowie für die Trennung der Gase. Eine Ansammlung von Gasen und eine Mischung derselben soll deswegen ausgeschlossen sein, da der ganze Apparat mit Zersetzungsflüssigkeit (Lösung von Aetzkali) gefüllt ist. Die Vorderseiten der Elektroden kommunizieren mit einem den Wasserstoff abführenden Kanal, die Rückseiten mit einem zweiten Kanal, welcher

für die Ableitung des Sauerstoffes bestimmt ist. Ein gemeinschaftliches Rohr führt den Elekrolyten zu.

Zwei cylinderförmige Behälter dienen dazu, die Gase von dem mitgerissenen, aus der Flüssigkeit herrührenden Schaum zu trennen.

Eine Reinigung der Apparate hat nach Bedarf bei ununterbrochenem Betriebe etwa alle 6 Wochen stattzufinden.

Die Apparate liefern laut Prospekt 168 l Wasserstoff und 84 l Sauerstoff pro Kilowattstunde und zersetzen hiebei 134 g Wasser.

System Schuckert.

Ueber die Wasserzersetzer der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Schuckert & Cie. Nürnberg ist in der Litteratur so gut wie nichts bekannt geworden, da die Apparate keinen Patentschutz geniessen.

Von der Firma erhielt ich jedoch freundlichst über ihre Wasserzersetzer folgende Mitteilung zugestellt:

„Die Schuckertschen Apparate zur Herstellung von Wasserstoff und Sauerstoff durch elektrolytische Zersetzung von Wasser bestehen aus gusseisernen Wannen, in welche eine entsprechende Anzahl Glocken eingebaut ist, die zum Auffangen der an den Elektroden sich entwickelnden Gase dienen; bei diesen Apparaten kommt, abgesehen von den kupfernen Stromzuleitungen und den aus Hartgummi bestehenden Isolierungen, nur Eisen als Konstruktionsmaterial zur Verwendung.

„Als Elektrolyt wird eine 15%ige Aetznatronlösung (NaOH) verwendet. Das sich während des Betriebes zersetzende Wasser muss von Zeit zu Zeit, ähnlich wie bei einer Akkumulatorenbatterie, durch Nachfüllen von destilliertem Wasser ersetzt werden, damit die Lösung in der ursprünglichen Konzentration erhalten bleibt. Ein Ersatz des Aetznatrons ist für gewöhnlich nicht erforderlich.

„Von diesen Apparaten, welche zu mehreren hintereinander geschaltet werden können, benötigt jeder zum Betriebe eine Spannung von 2,3 bis 3,0 Volt. Die Elektrolyseure arbeiten am rationellsten, d. h. mit der geringsten Spannung (2,8 Volt), wenn der Elektrolyt auf einer Temperatur von ca. 70° C. gehalten wird, was ohne weiteres die von dem durchgehenden elektrischen Strom erzeugte Wärme bewirkt, wenn die Elektrolyseure möglichst vor einer Wärmeabgabe nach aussen geschützt werden. Zu diesem Zwecke umgibt man die Apparate mit einer Wärmeschutzmasse, am einfachsten, indem man

sie in mit Sand gefüllte Holzkasten einbettet, und zwar so, dass die eisernen Wannen ringsum von einer ca. 5 cm dicken Sandschichte umgeben sind.

„Bei Beginn des Betriebes wird der Kraftbedarf der Elektrolyseure die normale Grenze etwas überschreiten, da eine gewisse Energie zum ‚Anheizen' der Apparate nötig ist, d. h. zur Erreichung der oben angegebenen, für den Betrieb günstigsten Badtemperatur von 70 ° C. Wo die Möglichkeit vorhanden ist, die Bäder bei Betriebsbeginn vielleicht mittels Dampf auf die normale Elektrolyttemperatur zu bringen, fällt der Mehrverbrauch an elektrischer Energie weg.

„Die sich entwickelnden Gase entweichen voneinander getrennt aus den Elektrolyseuren durch vorgesehene eiserne Rohrstutzen, werden von da ab mittels Gummischläuchen, welche zur Isolierung der Elektrolyseure von den Rohrleitungen eingeschaltet werden, in die für Wasserstoff und Sauerstoff getrennt zu haltenden Rohrleitungen geführt und alsdann durch Kondenstöpfe und Waschapparate, nach gehöriger Reinigung von etwa mitgerissenen Laugeteilchen, in die Gasometer abgeführt.

„Die Gase dürfen den Elektrolyseuren mit einem Ueberdruck von nicht über 80 mm Wassersäule entnommen werden, da sonst eine Mischung der Gase in den Apparaten eintreten kann. Bei Beachtung dieser Vorschrift ist das Arbeiten mit den Schuckertschen Apparaten, wie sich aus langjährigen Versuchen und praktischem Betriebe ergeben hat, vollkommen gefahrlos; die Reinheit der Gase beträgt 97 bis 98 %.

„Die Gase sind beim Verlassen der Apparate gänzlich explosionssicher und werden auch im weiteren Verlaufe ihrer Aufbereitung keinen Anlass zu Explosionserscheinungen geben, sofern die Rohrleitungen, Wasch- und Reinigungsapparate, sowie eventuell Kompressoren in genügend fachmännischer Weise installiert sind.

„Die Elektrolyseure werden in normaler Ausführung für eine Betriebsstromstärke von 600 Ampère gebaut, mit Wannen von 660 mm Länge, 450 mm Breite und 330 mm Höhe in den Aussendimensionen, berechnet für eine Füllung von ca. 50 l Lauge. Das Gewicht eines solchen Apparates beträgt ca. 220 kg.

„Jeder Apparat erzeugt pro Stunde rund 220 l Wasserstoff und 110 l Sauerstoff, gemessen über Wasser bei einer Temperatur von 15 ° C. und einem Luftdruck von 760 mm Quecksilbersäule."

Den Schuckertschen Apparaten wird die Vereinigung folgender guter Eigenschaften nachgerühmt:

1. Die Elektrolyseure bieten absolute Betriebssicherheit.
2. Die einzelnen Elektroden und die dazu gehörigen Vorrichtungen zum Auffangen des Gases können während des Betriebes ohne Unterbrechung oder Beeinflussung dieses letzteren ausgewechselt werden.
3. Die Apparate erfordern wenig Wartung und Bedienung; es genügt, jeden Tag etwas Wasser nachzufüllen.

Ueber die Ergebnisse in einer ausgeführten Schuckertschen Anlage bezüglich der Kosten der elektrolytisch gewonnenen Gase siehe weiter unten (S. 130).

System Schoop.

Für die Wasserzersetzer System Schoop (Fig. 10) ist die längliche cylindrische Form derselben charakteristisch; diese Form der Kessel ist durch die röhrenförmigen Elektroden (Fig. 11) bedingt, deren Hohlräume zur Vergrösserung der an der Elektrolyse beteiligten Oberfläche mit feinstem Bleidraht ausgefüllt sind. Die eigentlichen Elektrodenröhren sind in ihrem unteren Drittel durchlocht und werden meist etwas länger gehalten als die sie umfassenden, ebenfalls perforierten Röhren JR aus isolierendem Material (Fig. 11). Diesen letzteren Röhren kommt die Rolle von Diaphragmen zu; nur unterscheiden sie sich von den gewöhnlichen Diaphragmen dadurch, dass sie eine Vermischung der Gase absolut ausschliessen, wodurch die Betriebssicherheit der Apparate in ausserordentlichem Masse gewährleistet ist, ein Moment, das bei der Beurteilung von Elektrolyseuren für Wasserstoff- und Sauerstoffgewinnung auch wegen der Reinheit der Gase nicht genug gewürdigt werden kann. Die unter der Abdichtungsmuffe M angebrachten Löcher LL gestatten den zwischen Isolierrohr und Bleirohr entwickelten Gasen den Abzug. Ueber dem hermetischen Verschluss befindet sich behufs leichter Kontrolle eine Schicht Wasser. Etwa in der Mitte des Rohres ist ein Führungsflansch aufgelötet, durch welchen die richtige Lage der Elektrode in dem Diaphragmenrohr gesichert wird.

Der Druck, unter dem die Gase in die Gasbehälter strömen, beträgt bis zu 1 m Wassersäule; jedoch hat die Praxis in Akkumulatorenfabriken ergeben, dass selbst für grössere Lötarbeiten ein höherer Druck als 500 mm Wassersäule nicht erforderlich ist. Die in dieser Anlage gewonnenen Gase dienen ausschliesslich für Bleilötung und werden aus den Elektrolyseuren vorerst in Gasometer von 14 bezw. 7 cbm Inhalt geleitet. Da das die Lötflamme speisende Gasgemisch aus ca. 3,5 Teilen Wasserstoff und 1 Teil Sauerstoff be-

steht, den in den Apparaten entwickelten Gasmengen jedoch das Verhältnis 2 : 1 entspricht, so muss von Zeit zu Zeit Sauerstoff ins Freie

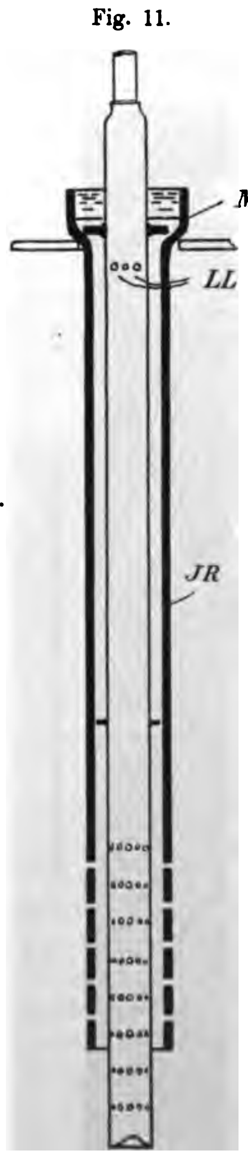


Fig. 10.

Wasserzersetzungsanlage nach System Schoop.

gelassen werden, oder aber (und dieser Aushilfsweg empfiehlt sich eher als der erstere) es ist täglich einmal an die Wasserstoffleitung eine Wasserstoffbombe anzuschliessen, um in den Gasometer einen

Fig. 11.



Elektrode eines Elektrolyseurs System **Schoop**. 1 : 9.

Ueberschuss von Wasserstoff einzublasen. Selbstverständlich darf mit dieser Manipulation nur ein äusserst zuverlässiger Mann betraut werden, da ein irrtümlicher Anschluss unter Umständen, trotz Sicherheitsvorrichtungen, die verhängnisvollsten Folgen nach sich ziehen könnte.

Eine Wasserzersetzungsanlage nach System Schoop besteht zur Zeit aus 18 Kesseln, die, ähnlich wie Akkumulatoren, auf Holzbalken sitzen und voneinander, sowie gegen Erde gut isoliert sind.

Auf dem Schaltbrett sind folgende zugehörige Apparate angebracht:

1 Weston-Ampèremeter bis 250 Ampère zeigend,
1 Voltmeter, um die Betriebsspannung der sämtlichen Bäder zu messen,
1 Stromrichtungsanzeiger,
1 Schwachstromausschalter,
1 Klingel zur Signalgebung für den Maschinisten,
2 Wassermanometer zur jederzeitigen Prüfung des vorhandenen Druckes in der Wasserstoff- bezw. Sauerstoffleitung.

Die Stromlieferung wird von einer Nebenschlussdynamo von 200 Ampère und 65 Volt besorgt.

Die Stromstärke wird etwas dem Bedarf angepasst und schwankt zwischen 150 und 200 Ampère. Die Betriebsspannung beträgt durchschnittlich 65 Volt, sinkt jedoch bei erwärmter Säure bis auf ca. 60 Volt.

Als Elektrolyt dient verdünnte, chemisch reine Schwefelsäure von bester Leitfähigkeit, d. h. von der Dichte 1,23. Es steht natürlich nichts im Wege, die Polarisation zu vermeiden und an Stelle der sauren eine alkalische Flüssigkeit zu verwenden, mit Eisen- oder Stahlblech als Elektrodenmaterial. Aber dem hiedurch erzielten Vorteil einer geringeren Betriebsspannung sind folgende Nachteile entgegenzuhalten:

1. Verteuerung der ganzen Anlage (Elektrolyt!) um ca. 50 %.
2. Schon bei mässiger Stromdichte wirkt die Schaumbildung von alkalischer Flüssigkeit störend.
3. Der Verschleiss der Elektroden tritt infolge von Eisensäurebildung erheblich früher ein, als mit Bleielektroden, wo der Plantéprozess (d. i. Ueberführung des Bleies an den positiven Elektroden in Bleisuperoxyd) wegen der sich nie ändernden Stromrichtung belanglos ist.

Legt man auf einen gewissen Ozongehalt des Sauerstoffes Wert, so ist der saure Elektrolyt überhaupt nicht wohl zu umgehen.

Wie schon die Anordnung der Röhren und Diaphragmen erkennen lässt (Fig. 11), ist eine auch noch so geringe Vermischung der Gase unmöglich, und in der That besitzen denn auch sowohl der Wasserstoff wie der Sauerstoff einen idealen Reinheitsgrad.

Kostenberechnungen.

Der Selbstkostenpreis von elektrolytischem Wasserstoff und Sauerstoff ist natürlich in erster Linie von dem Kraftpreis und der Verzinsung des Anlagekapitales abhängig, und erst in zweiter Linie von den indirekten Kosten und der Amortisation der Anlage. Die durch Bedienung und Ueberwachung entstehenden laufenden Betriebskosten werden meist so klein sein, dass sie für eine Rentabilitätsberechnung kaum in Frage kommen.

Mario Buffa [1]) gibt über Betriebskostenberechnungen folgende Daten, welche sich auf die Anlage Tivoli bei Rom beziehen, wo das Kilowattjahr 96.60 Frs. kostet.

1 cbm Wasserstoff und ½ cbm Sauerstoff kosten zusammen 20 Cts., wenn Verzinsung des Anlagekapitales und Amortisation unberücksichtigt bleiben. Bei einer Verzinsung von 5 % und einer Amortisation von ebenfalls 5 % kommen 1 cbm Wasserstoff und ½ cbm Sauerstoff auf 38 Cts. im nicht komprimierten Zustande und auf 42 Cts. in komprimierter Form.

Für Akkumulatorenfabriken, Cellulose- und chemische Fabriken, wo grosse Mengen Wasserstoff verbraucht werden, dürfte eine vergleichende Kostenberechnung der chemischen und elektrolytischen Erzeugung von Wasserstoff nicht ohne Interesse sein. Legen wir der Berechnung wiederum die Herstellung von 1 cbm Wasserstoff und ½ cbm Sauerstoff zu Grunde, so erhalten wir die folgenden Werte.

[1]) L'électrolyse industrielle de l'eau; Liège 1900.

Auf chemischem Wege dargestellt:

1 cbm Wasserstoff entspricht ca. 3 kg Zink à 0.50 M.	= 1.50 M.
5 kg H_2SO_4 à 0.10 M.	= 0.50 „
Summa	2.— M.

Auf elektrolytischem Wege dargestellt:

1/2 cbm Sauerstoff, 1 „ Wasserstoff } entsprechen rund 11 PS-Stunden à 0.04 M. = 0.44 M.

Diese Daten sind nicht etwa für den elektrolytischen Betrieb zu optimistisch gefärbt, sondern beziehen sich vielmehr auf thatsächlich erhaltene Betriebsergebnisse. Hiebei ist noch zu berücksichtigen, dass mit 1 cbm Knallgas ziemlich genau die doppelte Arbeit erledigt werden kann, so dass sich thatsächlich eine noch viel grössere Ersparnis ergibt.

Latschinoff[1]) kommt in seiner Kostenberechnung zu einem Ergebnis, welches von dem oben mitgeteilten nicht sehr verschieden ist; der gewonnene Wasserstoff wurde für die Füllung von Luftballons benützt.

Eine Dynamomaschine von 50 PS lieferte 300 Ampère bei 110 Volt, wobei 2,75 cbm Sauerstoff und 5,5 cbm Wasserstoff entwickelt wurden. Die laufenden Betriebskosten setzten sich zusammen wie folgt:

50 PS in 36 Stunden, die PS-Stunde zu 4 Kopeken berechnet	72.—	Rubel
Verbrauchtes Aetznatron	0.10	„
Verbrauchte konz. H_2SO_4 für die Trockenkammer .	0.10	„
200 l Wasser und Gips für die Trockenkammer .	0.20	„
Beaufsichtigung und Bedienung 36 Stunden . . .	5.—	„
Summa	77.40	Rubel

so dass 1 cbm Wasserstoff und 1/2 cbm Sauerstoff zusammen auf etwa 40 Kopeken zu stehen kommen.

Die Kosten der nach System Schuckert elektrolytisch erzeugten Gase berechnen sich nach Ergebnissen ausgeführter Anlagen wie folgt[2]):

Um in 24 Stunden 100 cbm Sauerstoff und 200 cbm Wasserstoff darzustellen, sind 60 Kilowatt oder rund 90 effektive PS nötig.

[1]) Handbuch der Elektrochemie von Ahrens 1896, S. 259.

[2]) Dr. R. Hammerschmidt und Johann Hess: „Zur Gewinnung von Sauerstoff und Wasserstoff auf elektrolytischem Wege". Chemiker-Zeitung 1898, Heft 14.

Anlagekosten:

Dampfmaschinenanlage, betriebsfertig montiert .	25 000 M.
Dynamo- und Zersetzungsanlage	48 000 „
Gebäudeanlange ca. 240 qm	12 000 „
Summa	85 000 M.

Tägliche Betriebskosten:

Kohlen für den Betrieb der Dampfmaschinen . . .	54 M.
Oel-, Putz- und Schmiermaterial	9 „
Löhne	18 „
Reparaturen und Erneuerungen (Elektroden)	6 „
Amortisation der Anlagekosten	14 „
10%ige Verzinsung der Anlage	29 „
100 cbm Sauerstoff und 200 cbm Wasserstoff kosten somit	130 M.

Für eine geringere Erzeugung ergeben sich die Kosten von 1 cbm Sauerstoff und 2 cbm Wasserstoff bei vorhandenen Baulichkeiten und im Anschluss an eine bestehende Kraftanlage, wie folgt:

22 PS-Stunden beispielsweise zu 4 Pf.	0.88 M.
Amortisation	0.20 „
Reparatur und Erneuerungen	0.10 „
Wartung der Anlage circa	0.15 „
Kosten von 1 cbm O und 2 cbm H exkl. Verzinsung	1,23 M.

Von den gegenwärtig existierenden elektrolytischen Wasserzersetzungsanlagen sind mir folgende bekannt:

1. Tivoli bei Rom (Garuti),
2. Sauerstoff- und Wasserstoffwerke Luzern von A. Gmür,
3. Société anonyme l'Oxhydrique Bruxelles-Molenbeeck (Garuti),
4. Platinschmelze Heräus in Hanau (Schuckert-Nürnberg),
5. Akkumulatorenfabrik Oerlikon-Zürich (Dr. Schmidt),
6. Kölner Akkumulatoren-Werke G. Hagen in Kalk a. Rh.,
7. Usine électrochimique Oloron Sainte-Marie, Frankreich,
8. Maatschappij Oxygenium in Schiedam, Holland.

III. Abschnitt.

Sicherheitsvorrichtungen.

Jedes brennbare Gas oder Gasgemisch erfordert eine bestimmte Temperatur zum Entzünden. Eine Kerzenflamme kann man durch ein kaltes Metall, z. B. eine Kupferdrahtspirale, so weit abkühlen, dass sie erlischt. Hält man über die Mündung eines Gasbrenners ein Drahtnetz, welches auf den Quadratcentimeter ungefähr 100 Maschen hat, und entzündet das darüber ausströmende Gas, so kann man das Netz mehrere Centimeter von der Brenneröffnung abheben, ohne dass die Flamme zurückschlägt und das unter der Metallgaze befindliche Gasgemisch entzündet. Die Metalldrähte leiten die Hitze so schnell ab, dass die Temperatur auf der anderen Seite nicht auf den Entzündungspunkt des Gases steigen kann. Jede Reaktion zwischen irgend welchen Stoffen bedarf zu ihrer Vollendung einer gewissen Zeit, auch die als Explosionen bezeichneten Reaktionen; wäre diese Zeit unendlich klein, so könnte diese von Davy und Faraday studierte Erscheinung für Sicherheitsvorrichtungen bei Knallgasbetrieb nicht verwertet werden.

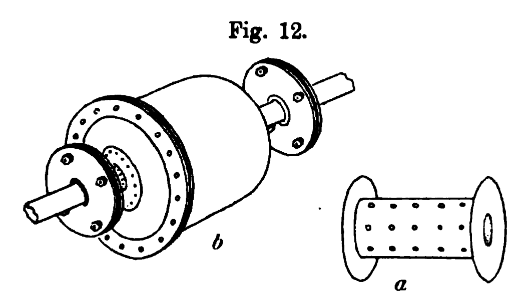
Auf dem Davyschen Prinzipe beruht die Wirkungsweise eines Sicherheitsapparates, der häufig bei chemischen Wasserstoffentwicklern benützt wird. Dieser Apparat besteht aus einem cylindrischen, kleinen Messingbehälter, dessen Inneres mit 10 bis 15 mit Messingdrahtgaze (50 Maschen pro Quadratcentimeter) überzogenen Ringen gefüllt ist. Es ist jedoch hervorzuheben, dass diese Schutzcylinder, obwohl für die Luft-Wasserstoffflamme zweckentsprechend, bei reinem Knallgas die Explosion unter Umständen nicht aufhalten, also der Wert derartiger Apparate illusorisch wird. Ich habe anlässlich solcher Versuche in einen 150 mm langen, cylindrischen Körper nach und nach 40 Stück Siebe gegeben, ohne dass hiedurch ein Ersticken der zurückschlagenden Knallgasflammen veranlasst worden wäre. Der Grund in dieser vielleicht auffallenden Erscheinung liegt in den verschiedenen hohen Temperaturen der reinen Knallgasflamme und der Luft-Wasserstoffflamme (mit ihrem Stickstoffballast); die durch das Metalldrahtgewebe zu bewirkende Flammenabkühlung wurde erst dann intensiv genug, als nicht nur die Anzahl der Siebe, sondern auch die Anzahl der Maschen pro Quadratcentimeter gesteigert wurde.

Auch die in Laboratorien vielfach angetroffenen „Fletscherbrenner“, bei denen das fertige Gasgemisch aus einem Siebe tritt,

sind für Knallgasbetrieb unbrauchbar. Dagegen hat sich für Knallgasbetrieb folgender Apparat gut bewährt:

Ein Kupfercylinder von 20 bis 25 mm Wandstärke (Fig. 12 a) ist an der einen Seite offen, an der anderen geschlossen und mit einer Anzahl nach der Längsachse gerichteten Durchlochungen versehen, wie dies aus der Abbildung ersichtlich ist. Durch die seitlich vorhandenen Scheiben erhält der Cylinder das Aussehen einer Spule, die nach Aufwindung von feinster Messinggaze (40 bis 50 Windungen) zum Gebrauche fertig ist und nur noch mit dem glockenförmigen Behälter (Fig. 12 b) zu verschrauben ist. Die Glocke erhält an jeder Seite einen hermetisch schliessenden Flansch und wird vor der endgiltigen Inbetriebsetzung in Wasser gesetzt und durch Hineinleiten von Wasserstoff auf Undichtigkeiten geprüft; dass zu diesem Zwecke das eine Ende des Apparates vorerst mit einem gut schliessenden Gummi-

Fig. 12.



Sicherheitsvorrichtung für Knallgasbetrieb.

stopfen oder dergleichen geschlossen werden muss, ist wohl selbstverständlich.

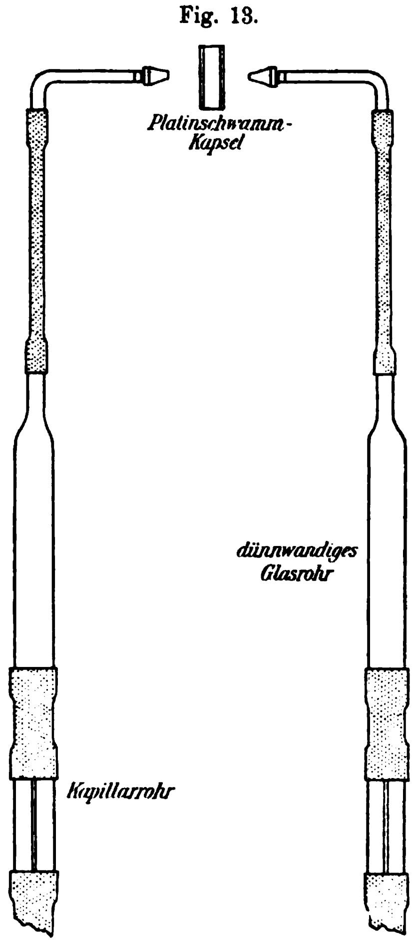
Anlässlich einer Reihe von Explosionsversuchen machte ich die Beobachtung, dass feinster Glaswolle in ausserordentlichem Masse die Fähigkeit zukommt, die zurückschlagende Knallgasflamme aufzuhalten, und zwar ist die Wirkung der Glaswolle dann am sichersten, wenn eine kleine Menge derselben unweit des Brennermundstückes in den Gaskanal gelegt wird.

Die Wirkung der Glaswolle ist wahrscheinlich wie folgt zu deuten:

Zahlreiche Versuche weisen darauf hin, dass die Abhängigkeit der Explosionsgrenzen von der Gefässweite eine sehr ausgeprägte ist, und dass sich Flammen an kalte Flächen nicht anlegen, sondern durch erkennbare Zonen geschieden bleiben. In einem cylindrischen Glasgefäss z. B. kann man beobachten, dass die Explosion schwach explosibler Gasmengen in Gestalt einer in der Mitte vorgewölbten Fläche fort-

schreitet. Die Wand bewirkt also in diesem Falle eine Verzögerung durch Wärmeentziehung, obwohl das Material aus Glas besteht. Da die Verbrennungswärme eines Gases pro Volumeneinheit von der Wandfläche unabhängig ist, deren wärmeentziehende Wirkung aber mit Zunahme der Wandfläche wächst, so ist die Funktion der durch die Glaswolle geschaffenen Porenkanäle in ähnlichem Sinne zu interpretieren, wie etwa die Wirkung eines Pfropfens aus feinem Metalldraht.

Fig. 13.



Sicherheitsvorrichtung in elektrolytischen Wasserzersetzungsanlagen.

Eine Sicherheitsvorrichtung, welche vermeiden soll, dass durch irgend einen Zufall oder Umstand (z. B. Schadhaftwerden von Diaphragmen, unbeabsichtigten Stromrichtungswechsel) in den Elektrolyseuren ein explosibles Gasgemisch unbemerkt entstehen könne, und die in den meisten Anlagen benützt wird, ist folgendermassen beschaffen (siehe Fig. 13):

Von der Wasserstoffleitung wird ein kleines Röhrchen abgezweigt und die Mündung auf ein wenig Platinschwamm geleitet, wodurch die Wasserstoffflamme automatisch zum Brennen kommt. In unmittelbarer Nähe der Wasserstoffflamme tritt aus einem ähnlichen Röhrchen kontinuierlich Sauerstoff. In beide Abzweigleitungen ist je ein Kapillarrohr von Glas oder eine Waschflasche oder beides zusammen eingeschaltet. An Stelle der Waschflasche kann auch ein dünnwandiges Glasrohr in Anwendung kommen, wie dies die nebenstehende Abbildung veranschaulicht. Sollte nun einmal in den Apparaten mehr oder weniger reines Knallgasgemisch entstanden sein, so schlägt die Dauerflamme in die dünne Leitung zurück und erlischt in der Kapillare; gleichzeitig wird natürlich das dünnwandige Glasrohr durch die Explosion zertrümmert.

Der einfachste Schutz gegen das zufällige Zurückschlagen der Flamme ist vielleicht eine Waschflasche, von denen auch mehrere hintereinander in die Hauptleitung geschaltet werden können; dadurch wird aber nicht nur ein mehr oder weniger ausgesprochenes Flackern der Arbeitsflammen eintreten, sondern es ist auch die Gefahr vorhanden, dass bei eintretender Explosion jemand durch die herumfliegenden Glasscherben verletzt wird. Ausserdem muss dann das Gas behufs Trocknung über mit konzentrierter Schwefelsäure getränkte Bimssteine geleitet werden und die Waschflasche an einem sichtbaren Ort zur Aufstellung gelangen, damit das Wasserniveau jederzeit der Beobachtung zugänglich ist.

Hydraulisches Ventil.

Bei gewissen Konstruktionen (z. B. Garuti ohne Verwendung von Gasbehältern) kann es vorkommen, dass bei zu hohem Gasdruck, hervorgerufen durch zu hohe Stromdichte, das Elektrolytniveau so stark heruntergedrückt wird, dass die Scheidewände ausser Wirkung treten und reinstes Knallgasgemisch erzeugt wird. Um dieser Gefahr vorzubeugen, sind die Elektrolyseure mit hydraulischen Ventilen in Verbindung, in welchen durch eine Wassersäule ein Gegendruck gebildet wird. Ueberschreitet nun der Gasdruck aus irgend einem Grunde das normal Zulässige, so wird das Wasser herausgeworfen, und hiedurch den Gasen freier Abzug gestattet; gleichzeitig hört auch der Ueberdruck auf.

Andere zugehörige Apparate einer elektrolytischen Wasserzersetzungsanlage sind:

1. je ein Wassersäulen-Druckmesser,
2. eine Vorrichtung zum bequemen Nachfüllen des verdunsteten und zersetzten Wassers,
3. eventuell ein Voltmeter mit einem Umschalter, der gestattet, die Spannung jedes beliebigen Bades zu messen. Bei Kurzschluss in einem der Bäder ist die Spannung an den Elektroden des betreffenden Bades sehr klein, bei Unregelmässigkeiten in der Flüssigkeitsdichte (oder wenn sich bei alkalischer Flüssigkeit grosse Mengen Krystallisationsprodukte gebildet haben) hoch,
4. die Apparate für die quantitative Analyse der Gase.

Reinheit der Gase.

Die Unreinheit der elektrolytisch erzeugten Gase kann erstens dadurch entstehen, dass die in den Zersetzern verwendeten Diaphragmen beschädigt oder aber derart beschaffen sind, dass a priori eine geringe Diffusion der Gase ermöglicht wird. Die Beschaffung eines unbedingt zuverlässigen und haltbaren Diaphragmenmateriales bereitet Schwierigkeiten, und es unterliegt keinem Zweifel, dass Elektrolyseuren für Wasserzersetzung mit undurchlässigen Scheidewänden der Vorzug gebührt (z. B. System Garuti). Eine absolute Reinheit der verdichteten Gase ist schon deshalb schwierig zu erzielen, da beim Füllen der Stahlbomben meistens Reste atmosphärischer Luft in die Flaschen gelangen bezw. in den Flaschen bleiben; ein sehr hoher Grad von Reinheit wird im allgemeinen auch nicht verlangt werden.

Für therapeutische Zwecke allerdings ist es unerlässlich, dass der Sauerstoff möglichst rein ist und keine Beimengungen von Kohlenoxyd, Kohlensäure oder Stickstoff enthalte, wogegen für technischen Gebrauch die Anwesenheit kleiner Mengen fremder Gase oder Wasserdampf belanglos ist. Vielmehr ist da die Frage von Bedeutung: Bei welchem Wasserstoffgehalt fängt der Sauerstoff und bei welchem Sauerstoffgehalt der Wasserstoff an, explosibel zu werden, und zwar bei dem für die Praxis in Betracht kommenden Druck? Die Antwort lautet: Enthält das eine Gas 6 bis 8 % (Volumen) des anderen Gases, so ist ein explosionsfähiges Gemisch vorhanden; ein solches ist aber zum voraus und trotz Sicherheitsvorrichtungen aus naheliegenden Gründen ganz und gar verwerflich.

Durchschnittlich sind die Fabrikanten in der Lage, einen Wasserstoff von 98 bis 99 % und einen Sauerstoff mit 96 bis 97 % Reingehalt zu liefern. Werden die Gase durch glühende Röhren geleitet, so kann ein noch höherer Reinheitsgrad erzielt werden, da hiebei das anwesende fremde Gas unter Wasserbildung verbrennt (unter der Voraussetzung, dass die Verunreinigung eines der beiden Gase durch das andere bewirkt worden ist, was für die Mehrzahl der Fälle zutrifft [1]).

[1]) Durchschnittlich ist der Titer der in Tivoli gewonnenen Gase: 98,5 für Wasserstoff, 97 für Sauerstoff.

Analysenbefund des Luzerner (speziell gereinigten) Medizinalsauerstoffes:

O	99,8 %
CO_2	0,1 %
N	0,1 %
	100,0 %

Bergwerkschaftliches Laboratorium in Bochum.

Bei Verwendung eines aus verdünnter Schwefelsäure bestehenden Elektrolyten tritt, besonders bei hohen Stromdichten, starke Ozonbildung auf. Dies thut der Güte des Produktes keinen Eintrag, nur ist zu beachten, dass Ozon Weichgummi heftig angreift und somit Gummischläuche, ganz gleichgiltig welcher Qualität, in kurzer Zeit zerfressen und untauglich werden.

Wird der Sauerstoff durch ein oder zwei Waschflaschen mit gewöhnlichem Wasser geleitet, so scheint das Ozon (wahrscheinlich unter Bildung von Wasserstoffsuperoxyd) in gewöhnlichen Sauerstoff zu zerfallen; wenigstens habe ich die eben erwähnte Erscheinung mit ozonreichem, nachträglich gewaschenem Sauerstoff nie mehr wahrgenommen.

Elektrolytische Ozongewinnung.

Der Gedanke liegt nahe, zu untersuchen, ob nicht ein Verfahren ausfindig zu machen wäre, um Ozon elektrolytisch im Grossen herzustellen; es mag jedoch sofort hinzugefügt werden, dass vorderhand darauf keine Aussicht vorhanden ist. Nach Targetti[1]), welcher die Ozonbildung in sauren Zersetzungsflüssigkeiten eingehend untersucht hat, sind die für ein Maximum der Ozonentwicklung geltenden Bedingungen folgende:

a) Dichte der Schwefelsäure 1,18 oder 22° Beaumé;
b) Anode und Kathode bestehen aus Weichblei;
c) hohe Stromdichte.

Mit einem Strome von 2,0 Ampère und einer Klemmenspannung von 7,4 Volt hat Targetti einen Sauerstoff erhalten, der 9% Gewichtsteile Ozon enthielt.

Quantitative Analyse von Sauerstoff und Wasserstoff[2]).

a) Sauerstoff.

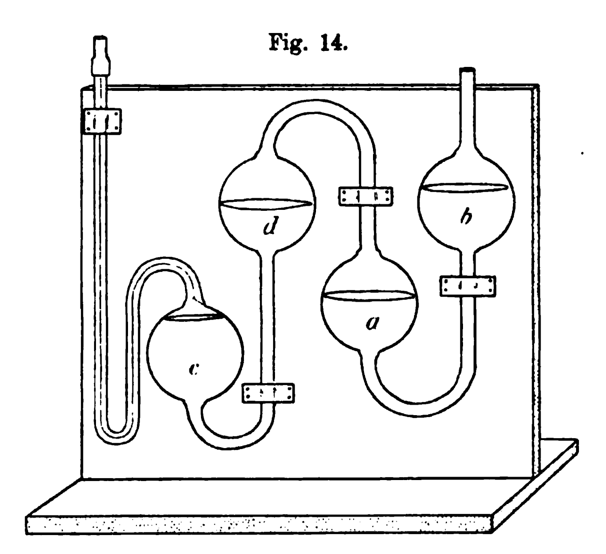
Von den für die quantitative Analyse des Sauerstoffes vorgeschlagenen technischen Methoden ist diejenige mit der zusammengesetzten Absorptionspipette wohl die bequemste. Dieser Apparat (Fig. 14) findet dort Anwendung, wo an der Luft veränderliche Absorptionsmittel (wie Pyrogallussäure) oder lästige Dämpfe ausstossende Substanzen (wie Brom) benützt werden. Die eigentliche Absorptions-

[1]) Éclairage électrique 1900, Bd. 88, Nr. 19.

[2]) Bunsen: Gasometrische Methoden.

vorrichtung ist bei dieser Pipette c und d, während das Kugelpaar a und b nach Eingiessen von etwas Wasser als hydraulischer Verschluss dient. Die Füllung des Apparates geschieht am besten dadurch, dass man auf das Kautschukende des an die Kugel c angeschmolzenen, U-förmig gebogenen Kapillarrohres ein wenigstens meter-

Fig. 14.



Absorptionspipette nach Hempel für quantitative Sauerstoffanalyse.

langes Trichterrohr aufsetzt, durch welches man die Absorptionsflüssigkeit eingiesst. Diese letztere weist folgende Zusammensetzung auf:

a) Natronlauge 1 : 3,
b) Pyrogallussäurelösung (1 : 5).
Die fertige Lösung besteht aus 3 Volumen a auf 1 Volumen b.

Ein ähnliches Rezept lautet:

10 g Pyrogallussäure, gelöst in 30 ccm Wasser,
240 g Aetzkali, gelöst in 160 ccm Wasser.

Die fertige Lösung ist stets möglichst unter Luftabschluss zu halten und kann dann für 10 und mehr Analysen benützt werden. Ist man über die relative Frische und Wirksamkeit der Lösung im Zweifel, so mache man eine Sauerstoffbestimmung der Luft. Hervorzuheben ist noch, dass man nicht mit Alkohol gereinigtes Aetzkali verwenden darf, und dass die Analysen nicht in Zimmertemperaturen unter 15° C. vorzunehmen sind.

Nachdem die zu untersuchende Sauerstoffmenge mit der Hempel-

schen Gasbürette in die Absorptionskugel c eingeleitet worden ist, wird der Apparat 10 bis 12 Minuten lang (je nach dem Alter der Absorptionslösung) nicht zu heftig hin und her geschwenkt und der Gasrest volumetrisch gemessen. Bei einiger Uebung erfordert die quantitative Bestimmung mit der besprochenen Methode nicht mehr als 10 bis 15 Minuten.

b) Wasserstoff.

Man bestimmt den Wasserstoff nach Hempel[1]) durch Occlusion mittels Palladiumschwammes; der Vorgang bei dieser Reaktion beruht jedoch nicht nur auf Occlusion, sondern auch auf Verbrennung, indem beim Zusammenbringen von Wasserstoff mit oxydulhaltigem Palladium zunächst eine partielle Verbrennung des Wasserstoffs unter Freiwerden von Wärme eintritt, wobei das beigemengte metallische Palladium auf diejenige Temperatur gebracht wird, wo es grosse Mengen von Wasserstoff durch Occlusion zu absorbieren vermag.

Handelt es sich bei der Untersuchung von Sauerstoff und Wasserstoff lediglich um eine Orientierung hinsichtlich der Explosionsfähigkeit, so leitet man etwas Gas unter Seifenwasser und entzündet die entstandenen Seifenblasen. Hat man es mit reinem Wasserstoff zu thun, so verbrennen die Blasen unter kaum vernehmbarem Geräusch.

Die chemische Analyse des Wasserstoffs hat den Nachteil, dass sie ziemlich umständlich und zeitraubend ist. Eine genaue Bestimmung des Reinheitsgehaltes von Wasserstoff lässt sich rascher durch die Dichtebestimmung des Wasserstoffs erzielen.

Gasdichten verhalten sich bekanntlich umgekehrt wie die Quadrate der Ausströmungsgeschwindigkeiten, mit denen die Gase unter gleichem Drucke aus einer engen Oeffnung (Kapillare) austreten. Dieses Gesetz ist ein Spezialfall des Torricellischen Theorems:

$$v = \sqrt{\frac{H}{D}},$$

wo v die Ausströmungsgeschwindigkeit, H den Druck, unter welchem das Gas ausströmt, D die Gasdichte bedeuten. Unter der Annahme, dass H konstant ist, gelangt man zu der Beziehung

$$\frac{v_a}{v_b} = \frac{\sqrt{d_b}}{\sqrt{d_a}}$$

[1]) Hempel: Gasanalytische Methoden. Braunschweig 1880.

oder, wenn T_a und T_b die zum Ausströmen erforderlichen Zeiten bedeuten, zu dem Ausdruck

$$\frac{T_a}{T_b} = \sqrt{\frac{d_a}{d_b}}.$$

Vergleicht man also die Zeit, welcher eine gemessene Gasmenge zum Ausströmen bedarf, mit der Zeit, welche ein gleiches Luftvolumen unter denselben Bedingungen braucht, so gibt das Zeitverhältnis, ins Quadrat erhoben, die Gasdichte.

Nach Bunsen[1]) nimmt man hiezu einen Glascylinder mit Hahn, der oben durch ein aufgeschmolzenes, dünnes Metallblech mit ganz feiner, ebener Oeffnung geschlossen ist, füllt denselben über reinem Quecksilber mit Wasserstoff, taucht den Cylinder tief in das Quecksilber ein und öffnet den Hahn. Da das undurchsichtige Quecksilber den Gasstand nicht direkt ablesen lässt, so beobachtet man den Gasstand mittels eines Schwimmers, der von dem Quecksilber im Cylinder getragen wird und der mit einigen gut sichtbaren Marken versehen ist. Man notiert die Zeitpunkte, wann diese Marken eben aus der Quecksilberoberfläche austreten.

Ein auf dem Prinzip der Ausströmungsgeschwindigkeit konstruierter Dichtigkeitsmesser für Wasserstoff ist von Bassani[2]) in Rom hergestellt worden. Durch das Ausströmen des Wasserstoffs wird eine Niveauveränderung einer Quecksilbersäule bewirkt und durch ein elektrisches Relais signalisiert. Das Relais wiederum ist mit einem Sekundenzähler verbunden, welcher die Ausströmungszeit mit Leichtigkeit zu berechnen gestattet.

Der Apparat ist ferner mit verschiedenen Regulierungsvorrichtungen ausgestattet, auf welche hier nicht näher eingegangen werden kann; dieselben erlauben, den Einfluss des Barometerstandes und der Temperatur zum voraus zu eliminieren.

IV. Abschnitt.

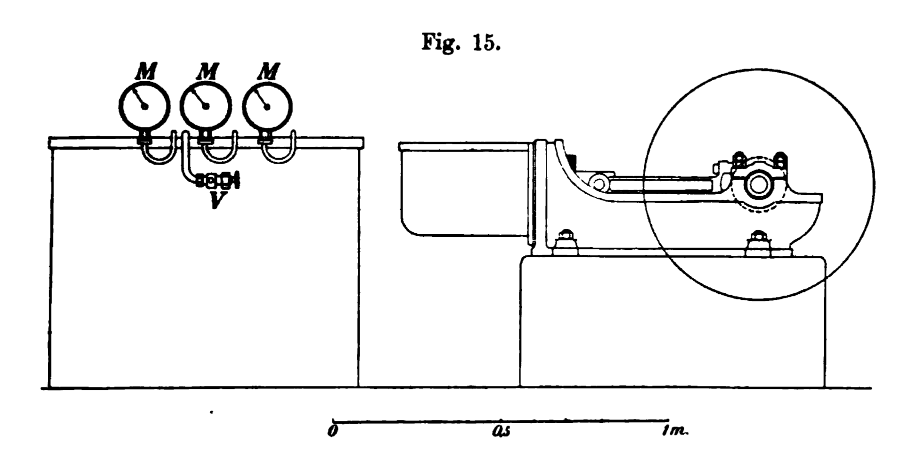
Das Komprimieren von Wasserstoff und Sauerstoff.

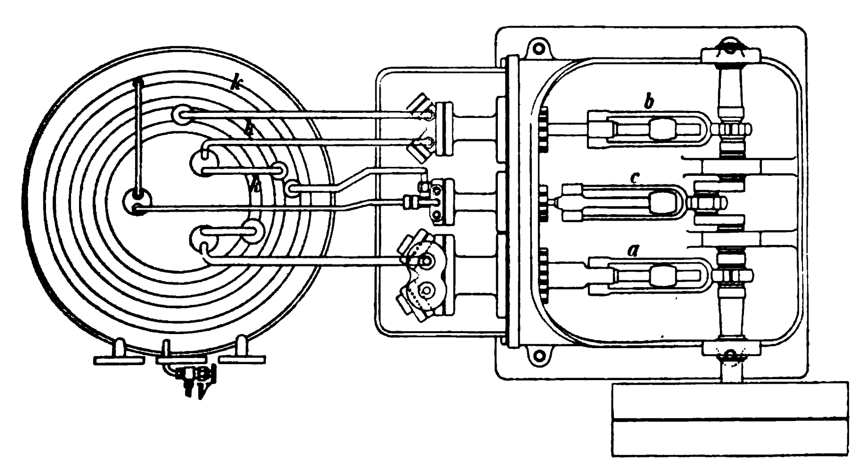
Die Erfahrungen, die man beim Komprimieren von Kohlensäure gewonnen hat, sind offenbar auch der industriellen Herstellung und

[1]) Vergl. Bunsen: Gasometrische Methoden, S. 188.
[2]) Vergl. Mario Buffa: L'électrolyse industrielle de l'eau; Liège.

Komprimierung von Wasserstoff und Sauerstoff zu gute gekommen. Wäre man nicht Imstande, die beiden Gase in verdichtetem Zustande und absolut ohne Gefahr zu verschicken, dann hätte der Aufschwung der Wasserstoff- bezw. Sauerstoffindustrie, wie er thatsäch-

Fig. 15.





Sauerstoffkompressor mit Kondensator der Fürther Maschinenfabrik.

lich in den letzten Jahren zu verzeichnen ist, nicht erfolgen können. Es bereitet heute nicht mehr die geringsten Schwierigkeiten, die beiden Gase bis zu einem Drucke von 200 und mehr Atmosphären zu verdichten. Jedoch wird von den Fabriken eine gewisse obere Grenze eingehalten, die 120 bis 150 Atm. beträgt.

Das Maschinenaggregat zum Verdichten von Wasserstoff und Sauerstoff besteht gewöhnlich je aus:

1. einem Kompressor mit drei Cylindern, d. h. je einem Cylinder für Niederdruck, Mitteldruck und Hochdruck, fester und loser Riemenscheibe, Ausrückvorrichtung, Schmierapparaten, Ankerschrauben und Ankerplatten. Zwecks Abkühlung der Cylinder werden diese samt den Saug- und Druckventilen zweckmässig in ein Wasserbad gelegt;

2. einem Kondensator, bestehend aus einem Wasserbehälter mit drei Schlangen, drei Reinigungsgefässen und drei Manometern, sowie einem Absperrventil mit Abfüllvorrichtung für die Gasbomben. Die konstruktive Anordnung dieses Kompressoraggregates geht aus Fig. 15 hervor, wo M, M, M die drei Manometer für Nieder-, Mittel- und

Fig. 16.



Sauerstoffkompressor für eine stündliche Leistung von $4\frac{1}{2}$ bis 5 cbm Gas.

Hochdruck, V die Abfüllvorrichtung für Versandflaschen, k, k, k die Kühlschlangen und a, b, c die Kolben für Nieder-, Mittel- und Hochdruck bedeuten. Die stündliche Leistung dieses Kompressors beträgt 1 cbm Sauerstoff, auf 120 Atm. verdichtet.

Fig. 16 zeigt uns eine grössere Kompressoranlage für Sauerstoff, welche pro Stunde 4,5 cbm Sauerstoff komprimiert und die von der Fürther Maschinenfabrik für die Sauerstofffabrik von Rommenhöller in Herste i. W. geliefert worden ist.

Einen Kompressor in aufrecht stehender Anordnung zeigt uns Fig. 17.

Das Füllen der Flaschen geht rasch von statten (je nach der Flaschengrösse und Leistung des Kompressors 5 bis 10 Minuten), wobei gegen das Ende der Füllung der Flaschenmantel sich hand-

warm anfühlt. Bei der Füllung darf natürlich nicht ausser acht gelassen werden, dass der Atmosphärendruck von der Temperatur des Gases abhängig ist, so dass der Enddruck in der Flasche beim Füllen

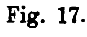
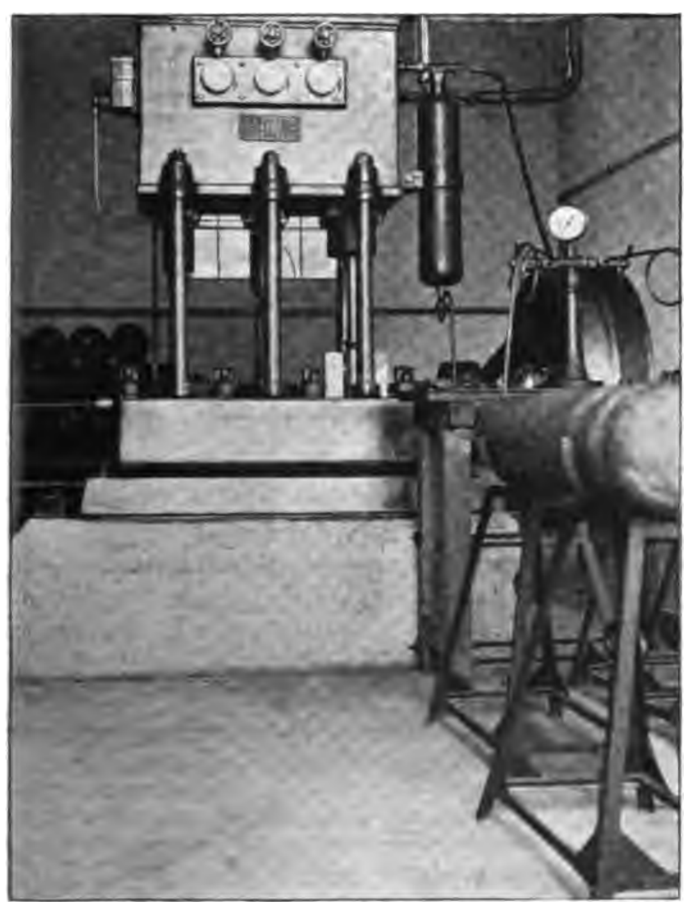


Fig. 17.



Wasserstoffkompressor des Sauerstoff- und Wasserstoffwerkes Luzern.
Der Kompressor ist von Schütz in Wurzen geliefert und verdichtet bei einem Kraftverbrauch von ca. 7 PS 36 cbm Wasserstoff pro Stunde (200 Atm.).

immer einige Atmosphären mehr betragen wird, als nach Erkaltung des verdichteten Gases.

Für den Sauerstoffkompressor darf zum Schmieren weder Oel noch Konsistenzfett verwendet werden, da der Sauerstoff in hohem Masse die Fähigkeit besitzt, besonders das Oel intensiv zu oxydieren und zu verdicken. Gewisse Oele entzünden sich sogar, sowie sie mit

reinem Sauerstoff unter einem Drucke von ca. 20 Atm. zusammengebracht werden. Die Schmierung des Sauerstoffkompressors, sowie der Ventile und Schrauben an den Sauerstoffflaschen, erfolgt lediglich mit reinem Wasser.

Stahlflaschen für Wasserstoff und Sauerstoff.

Die zur Aufnahme der verdichteten Gase bestimmten Stahlflaschen sind grossen Shrapnels nicht unähnlich und werden in verschiedenen Grössen in den Handel gebracht. Die kleinsten fassen nur 1 bis 2 Wasserliter und dienen, mit Sauerstoff gefüllt, für Laboratorien und Wiederbelebungsversuche in Bergwerksbetrieben, die grössten fassen bis zu 160 Wasserliter, entsprechend einem Gasinhalt von 20000 l bei 125 Atm.

Diese Flaschen werden nach verschiedenen mehr oder weniger geheim gehaltenen Verfahren hergestellt, die es ermöglichen, Flaschen ohne Nähte und ohne aufgeschweissten Boden anzufertigen. Die Rheinische Metallwaren- und Maschinenfabrik arbeitet nach dem „Erhardtschen Pressverfahren" und benützt für aussergewöhnlich hohe Drucke einen (Siemens-Martin) Spezialstahl von ca. 60 bis 65 kg absoluter Festigkeit pro Quadratmillimeter und 15 bis 20 % Dehnung. Die Abmessungen, Gewichte, Rauminhalte und Preise der gangbarsten Flaschengrössen sind in folgender Tabelle zusammengestellt und einem Preistarif der Sauerstoff- und Wasserstoffwerke Luzern entnommen:

Tabelle über Flaschen für verdichtete oder verflüssigte Gase.

Länge in m	Aeusserer Durchmesser in m	Ungefähres Gewicht in kg	Wasserliter	Preis der leeren Flaschen in Franken
0,432	0,076	6	1,40	28.—
0,609	0,102	11	3,68	32.—
0,600	0,140	20	7,00	36.—
0,930	0,140	20	11,00	40.—
1,346	0,140	40	16,70	56.—
1,090	0,203	45	26,80	72.—
2,000	0,205	73	50,00	96.—

Die Wandstärke der Flaschen richtet sich einesteils nach der Flaschengrösse, andernteils nach dem Prüfungsdruck und schwankt zwischen 4 bis 9,5 mm.

Die Flaschen unterliegen einer behördlichen Prüfung, und zwar sind für die meisten Länder die Bestimmungen des internationalen Transportreglements massgebend. Der Prüfungsdruck beträgt durchschnittlich das zweifache des Betriebsdruckes, also 250 bis 300 Atm. In der Schweiz werden die Flaschen durch die eidgenössische Materialuntersuchungsanstalt in Zürich geprüft.

Das internationale Transportreglement schreibt unter anderem auch vor, dass die Flaschen nicht über 2 m lang und im Querschnitt nicht über 24 cm sein dürfen. Die Flaschen sind mit Fuss- und Abschlusskappe zu versehen und haben alle 3 Jahre einer behördlichen Nachprüfung zu unterliegen.

Den Flaschen wird ein amtliches Attest über die ausgeführte Druckprobe beigegeben, und jede Flasche erhält das Prüfungsdatum und den Stempel des Beamten eingeprägt. Die Kontrolle der Wandstärken findet statt, bevor die Flaschen geschlossen sind.

Bei der Druckprobe werden um die Flaschen mehrere Stahlbänder gelegt; an einem darüber gezogenen Querstrich erkennt man durch die Verschiebung der Marken gegeneinander die elastische Ausdehnung. Bei tadellosem Material muss letztere beim Nachlassen des Druckes wieder verschwinden, wobei die Marken wieder in eine gerade Linie rücken.

Die Wasserdruckprobe kann auch mit einem sogenannten „Water-jacket" vorgenommen werden, dessen Wirkungsweise darauf beruht, dass bei der durch den Druck bewirkten Ausdehnung der Flasche Wasser in ein Steigrohr verdrängt wird. Bei der Druckverminderung muss das Wasser in dem Steigrohr wieder zurückgehen[1]).

[1]) Sehr interessant sind die Versuche, die im Sommer 1899 von seiten der Eidgenössischen Munitions- und Waffenfabriken in Luzern mit Wasserstoff-flaschen (Luftschifferflaschen) verschiedener Herkunft vorgenommen wurden, wobei das Verhalten der Flaschen gegen die Wirkung von Infanteriegeschossen festgestellt werden sollte. Je eine 2,6 m lange Flasche einer deutsch-österreichischen Gesellschaft und von der Rheinischen Metallwaren- und Maschinenfabrik in Düsseldorf wurden nacheinander hiezu herangezogen. Die Flaschen waren mit Wasserstoff von 200 Atm. Spannung gefüllt und wurden in vertikaler Lage aus ca. 100 m Entfernung mit dem neuen schweizerischen Gewehr beschossen. Beim 25. Schusse auf die eine Flasche erfolgte eine heftige Explosion, und die Flasche ging in Stücke. Bei der Flasche der Rheinischen Metallwaren- und Maschinenfabrik trat nach dem 50. Schusse ein einfaches Entleeren ein, das Gas strömte aus. Die nachträgliche Besichtigung ergab, dass an einer Stelle, wo mehrere Geschosse beinahe auf einen Punkt aufgeschlagen hatten, ein Loch von der Grösse einer grossen Erbse entstanden war. Das Flaschenmaterial war offenbar dem anderen hinsichtlich der Zähigkeit überlegen.

Die Prüfmaschine für Flaschen mit flüssigen oder hochgespannten Gasen von Prof. Amsler-Laffon in Schaffhausen ist eine einfache Kolbenpumpe, die Wasser in die zu prüfende Flasche presst. Der Flüssigkeitsdruck wird sowohl an einem Federmanometer als an einem Quecksilbermanometer mit grosser Ablesung angezeigt. Man lässt die von einem Transmissionsriemen getriebene Pumpe laufen, bis der gewünschte Probedruck (bei Kohlensäureflaschen 250 Atm.) erreicht ist, und stellt die Pumpe ab. Nach Verlauf der Beobachtungszeit lässt man die Pumpe rückwärts laufen, bis sie sich von selbst abstellt, und öffnet das Ventil nach einem kalibrierten Glasgefäss. Hat eine bleibende Ausweitung der Flasche stattgefunden, so sinkt der Wasserstand im Glasgefäss, welches eine Teilung besitzt, die die Volumvergrösserung in Kubikcentimetern direkt ablesen lässt.

Das Gas wird den Flaschen nicht direkt entnommen, sondern durch Vermittlung von Reduzierventilen (Fig. 18), die auf dem Flaschenkopf aufgeschraubt werden und meist mit Manometern für geringe Drucke ausgestattet sind, um den Druck, unter dem das Gas an die Verbrauchsstelle strömt, nach Belieben zwischen $^1/_{10}$ Atm. und 1 Atm. einstellen und regulieren zu können.

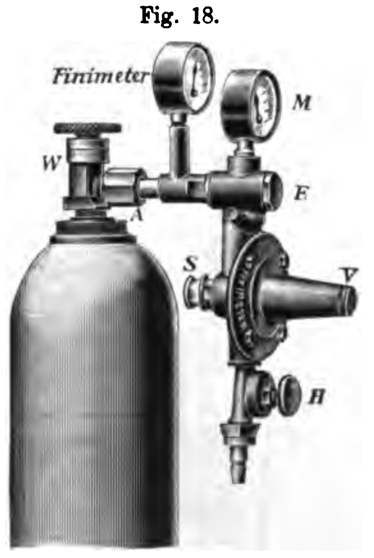
Diese Reduzierapparate sind ganz nach Art der Kohlensäureventile gebaut und halten bei vorsichtigem und sachgemässem Gebrauch jahrelang; jedoch ist zu beachten, dass der Verschleiss der Ventile viel früher stattfindet, wenn dieselben unnötigerweise und tagelang unter Druck belassen werden, wie dies z. B. auf Montagen von Akkumulatorenbatterien öfters vorkommt. Sobald die Flaschen nicht mehr benützt werden, ist das Hauptventil gut zuzudrehen und das in den Ventilen zurückbleibende Gas abzublasen.

Trotz des verhältnismässig grossen Gewichtes haben die Flaschen immer noch eine gewisse Handlichkeit, welche das Arbeiten und Hantieren mit den Flaschen erleichtert. Die Bedienung derselben ist überaus einfach und erstreckt sich lediglich auf das Anschrauben der Reduzierapparate und das Auf- und Zudrehen der Hähne.

Um jederzeit in der Lage zu sein, das noch vorhandene Gasquantum zu kennen, wird zwischen dem Ventilkopf und dem Reduzierapparat ein Manometer für Hochdruck eingeschaltet. Derartige Manometer in sehr kompendiöser Form werden auch unter der Bezeichnung „Finimeter" (von Dräger, Manometerfabrik in Lübeck) in den Handel gebracht. Die Anzahl Wasserliter, die auf den Flaschen immer angegeben ist, multipliziert mit den noch vorhandenen Atmosphären, ergibt das vorhandene Gasquantum in Litern (wenn die Gastemperatur = 15 ° C.).

Gewöhnlich schickt man den Akkumulatorenmonteuren Manometer für Hochdruck nicht mit, da sich die für eine gewisse Arbeit erforderlichen Gasmengen zum voraus annähernd berechnen lassen und die Flaschen vor dem Versand an den Montageplatz auf ihren Solldruck geprüft werden. Von dem Sauerstoffwerk Rommenhöller & Co. in Herste i. W. werden neuerdings Reduzierventile in den Handel gebracht, bei denen die beiden Manometer für Hoch- und Niederdruck in einem Instrumente vereinigt sind.

Fig. 18.



Stahlflasche für hochgespannte Gase mit angeschlossenem Reduzierventil und Finimeter.

Finimeter-Automat.

Fig. 18 zeigt uns einen Ventilkopf mit angeschraubtem Reduzierventil und dazwischen geschaltetem Finimeter-Automat von Dräger in Lübeck. M ist das Manometer für Niederdruck, von 0,0 bis 3,0 Atm. zeigend, W das Hauptventil, A die Verbindungsmutter des Manometers für Hochdruck, V eine Verschlussmutter, nach deren Entfernung die Reduzierstellschraube sichtbar wird, H endlich ein Konushahn für den Gasaustritt. Die ganze Anordnung entspricht der Einrichtung, wie sie allgemein für Kohlensäureflaschen eingeführt ist.

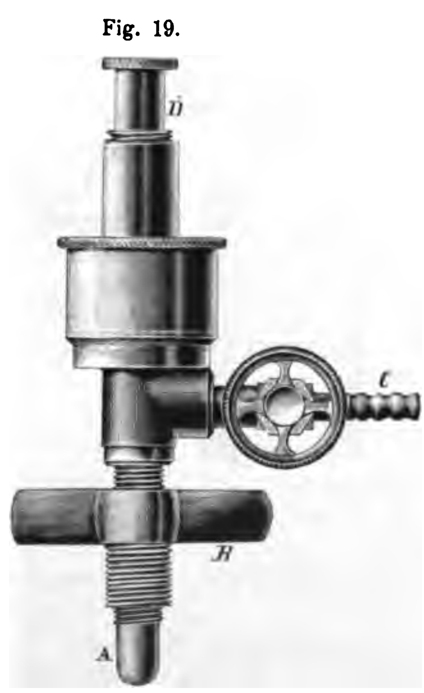
Eine Bedienungsvorschrift, die vom Verfasser dieses für die Monteure der Kölner Akkumulatorenwerke von G. Hagen in Kalk a. Rh. ausgearbeitet worden ist, hat folgenden Wortlaut:

Bedienungsvorschrift für Stahlflaschen mit verdichtetem Wasserstoff und Sauerstoff.

„Sowohl der Wasserstoff wie der Sauerstoff stehen anfangs unter einem Drucke von 120 bis 125 Atm. Es sollten deshalb die gefüllten Flaschen möglichst sorgfältig abgeladen und an dem Verwendungsorte aufgestellt werden. Um zu vermeiden, dass durch einen Zufall oder eine Unvorsichtigkeit eine Flasche umgeworfen bezw. umgestossen werde, ist das Flaschenpaar zu kuppeln, was am besten mit starkem Draht oder Bandeisen zu bewerkstelligen ist.

„Damit ein Irrtum nicht vorkommen kann, sind die Wasserstoffflaschen immer mit einem rot gemalten Streifen (in unmittelbarer Nähe des Hauptventils) versehen, und ebenso sind die zu den Wasserstoffflaschen gehörigen Reduzierventile, welche den hohen Druck auf den nötigen Arbeitsdruck vermindern, mit roter Farbe gekennzeichnet. Ausserdem sind die Wasserstoffflaschen und Wasserstoffreduzierventile mit Linksgewinde versehen, so dass eine Verwechslung der Apparate oder der Verschlussmuttern ausgeschlossen ist.

Fig. 19.



Belgisches Reduzierventil ohne Manometer.

„Bei der Inbetriebsetzung der Flaschen ist folgendes zu beachten:

„Nachdem die Schutzkappen entfernt worden sind, lässt man durch Oeffnen der Hauptventile etwas Gas ausblasen, damit allfälliger Schmutz später nicht in die Reduzierapparate gelangen kann. Sodann werden die Reduzierventile vermittelst der Muttern angeschraubt, wobei die Abdichtungsringe aus rotem Fiber behufs guter Abdichtung zu befeuchten sind. Nun werden die Hähne des Reduzierventiles geschlossen, die Hauptventile aufgemacht und gleich wieder geschlossen. Ist irgendwo eine undichte Stelle, so sinken die Zeiger der Manometer mehr oder weniger rasch.

„Der Arbeitsdruck für Wasserstoff und Sauerstoff soll im allgemeinen 0,5 Atm. nicht überschreiten; beträgt derselbe über 1 Atm., so springen die Schläuche ab.

„Das vorteilhafteste Gasgemisch besteht für die Bleilötung aus ca. 4 bis 5 Teilen Wasserstoff und 1 Teil Sauerstoff. Ist zu viel Sauerstoff vorhanden, so entsteht an der Lötstelle eine der guten Bindung hinderliche Oxydhaut oder die Flamme springt unter einem kleinen Knall in die Mischkammer des „Sparhahnes“ zurück und erlischt. Beim Anzünden der Flamme empfiehlt es sich, zuerst nur Wasserstoff ausströmen und hernach allmählich Sauerstoff zuströmen zu lassen, bis die gewünschte Flamme vorhanden ist; die

Grösse des Brennermundstückes richtet sich nach der betreffenden Arbeit.

„Beim Abstellen ist darauf zu achten, dass zuerst der Sauerstoff abgedreht wird und nicht der Wasserstoff. Nun werden die Hauptventile geschlossen und die in den Manometern zurückgebliebenen Gase abgeblasen. Wird diese Regel nicht eingehalten, so können die Manometer rasch zu Grunde gehen.

„Nach Schluss der Montage sind sowohl die leeren als auch halbleeren Flaschen mit Kreide zu bezeichnen, wodurch erspart wird, dass die an das Werk zurückgesandten Flaschen nochmals auf ihren Inhalt geprüft werden müssen."

In Frankreich, Belgien, Holland und Italien sind Reduzierventile ohne Manometer im Gebrauch (Fig. 19). B ist die Anschlussmutter, D die Handregulierschraube, C ein gewelltes Messingrohr für Anschluss eines Gummischlauches. Derartige Ventile können natürlich recht billig hergestellt werden, dieselben sind jedoch in Deutschland vorderhand nicht gestattet.

V. Abschnitt.

Praktische Verwendung von Wasserstoff und Sauerstoff.

Das Verwendungsgebiet von Wasserstoff und Sauerstoff ist heute schon ein ziemlich ausgedehntes, wenn auch nicht in Abrede zu stellen ist, dass ein eigentlicher Markt für Wasserstoff und Sauerstoff erst geschaffen werden muss. Es ist jedoch mit Bestimmtheit anzunehmen, dass sich die beiden Zersetzungsprodukte des Wassers in kurzer Zeit neue Industriezweige erobern und in grossem Massstabe zur Verwendung gelangen werden, besonders dort, wo billige Betriebskraft zur Verfügung steht, die eventuell die Herstellung einer eigenen Wasserzersetzungsanlage als rentabel erscheinen lässt.

Es lässt sich nicht leugnen, dass der Verwendung von verdichtetem Wasserstoff und Sauerstoff für industrielle Zwecke zum Teil der hohe Flaschenpreis hindernd im Wege steht. Wie der S. 144 gegebenen Zusammenstellung über Grösse, Gewicht und Preise von Stahlflaschen zu entnehmen ist, repräsentieren 200 mittelgrosse Flaschen (à 40 M.) bereits ein Kapital von 8000 M. (ohne die nötigen Manometer und Reduzierventile). Mögen nun die Flaschen von dem Gasfabrikanten oder aber von den Gaskonsumenten angeschafft werden,

immer spielt das Flaschenkonto eine bedeutsame Rolle, die nach Gebühr zu würdigen ist. Das Luftschiff des Grafen Zeppelin brauchte für eine einzige Füllung rund 10000 cbm Wasserstoff. Unter Zugrundelegung der Verwendung von grössten Flaschen (mit ca. 6 cbm Wasserstoffinhalt), entspräche der für die Füllung des Ballons erforderliche Flaschenpark ca. 1600 Flaschen, die nahezu 100000 M. kosten; dazu kommt noch der Preis für den Wasserstoff und die Transportkosten.

Dieses Beispiel ist so recht geeignet, die finanzielle Bedeutung zu beleuchten, die dem Flaschenbestande zukommt, besonders für eine Fabrik, die ihr Auskommen in der Herstellung und in dem Verkauf verdichteter Gase sucht.

Der Preis der Gase selbst ist ja im Verlaufe weniger Jahre ausserordentlich gesunken und beträgt heute nur noch

für Wasserstoff 1.60 bis 2.— M. pro Kubikmeter
für Sauerstoff 3.— bis 3.50 M. „ „

unter Voraussetzung von grösseren Abnahmen und in Eigentumsflaschen. Neuerdings soll Wasserstoff von einer chemischen Fabrik auf den Markt gebracht werden, welche dieses Gas bei gewissen chemischen Prozessen als Nebenprodukt erhält. Die Gestehungskosten von so gewonnenem Wasserstoff werden naturgemäss sehr niedrig sein und sich lediglich aus den Kosten für die Kompression, Personal, sowie Schmiermaterial und Amortisation des Kompressors zusammensetzen. Ob dieser Wasserstoff ohne spezielle Reinigung den für die meisten Zwecke zu verlangenden Reinheitsgrad von 98 bis 99 % besitzt, ist dem Verfasser nicht bekannt.

Nach dieser kleinen Abschweifung über Flaschen und Marktpreise von Wasserstoff und Sauerstoff kommen wir zur Besprechung der verschiedenen Verwendungsgebiete, als:

1. Therapie (Seekrankheit, Narkose mit Chloroform-Sauerstoff. Wiederbelebungsversuche in Bergwerken u. s. f.);
2. Löten und Schweissen der verschiedensten unedlen und edlen Metalle vermittelst Knallgas (Blei, Aluminium, Bronze, Eisen, Platin);
3. Aufschmelzen des Abstichloches in Hochofenbetrieben;
4. Aëronautik;
5. Glasfabrikation;
6. Beleuchtung (Drummontsches Kalklicht, mit Wasserstoff gespeiste Auerbrenner, Wasserstoff mit Kohlenwasserstoff karburiert);

7. Laboratorien (Lötrohranalysen, Glühversuche);
8. Automobilen mit komprimiertem Wasserstoff;
9. Andere Verwendungsarten.

Ich brauche wohl nicht des besonderen zu erwähnen, dass diese Zusammenstellung von Verwendungen der beiden Gase nicht im entferntesten Anspruch auf Vollständigkeit machen kann. Hingegen sind hier einesteils die heute wichtigsten Verbrauchsarten angegeben, teils haben sie, wie z. B. die sub 2, 3 und 5 angeführten, grosse Aussicht auf Bedeutung in nächster Zukunft.

Verwendung des Sauerstoffs für therapeutische Zwecke.

Ueber den Sauerstoff (mit und ohne Ozon) als Bestandteil des Arzneischatzes liegt eine bereits recht ansehnliche Litteratur vor[1]). Es sind hauptsächlich einzelne besondere Krankheitsgruppen und Affektionen, bei denen die Sauerstoffinhalation den Arzt selten im Stich lässt, und wo der Sauerstoff als Spezifikum zu betrachten ist:

a) bei Vergiftungen durch Kohlenoxyd, Leuchtgas, Minengas;
b) bei Wiederbelebungsversuchen bei Ertrunkenen;
c) bei der Seekrankheit;
d) Krankheiten der Lunge, des Herzens und des Blutes.

In überfüllten Räumen bewirkt Sauerstoffmangel bekanntlich Unbehagen, im schlimmsten Falle Erkrankung und Tod durch Erstickung. So ist auch die Bergkrankheit als ein Leiden aufzufassen, das durch den auf hohen Bergen herrschenden Mangel an Sauerstoff hervorgerufen wird. Aus demselben Grunde nehmen auch die Luftschiffer bei ihren Hochfahrten stets einen gewissen Sauerstoffvorrat mit, um sich Sauerstoff in die Lungen zuzuführen und sich dadurch vor Ohnmacht zu bewahren.

Seit Jahren wird auch auf den verschiedensten Erz- und Kohlengruben komprimierter Sauerstoff vorrätig gehalten, um eintretenden Falls bei Gegenwart schlagender Wetter oder anderer Gase unpassierbare Schächte und Stollen betreten zu können. Zum Schlusse möge noch erwähnt werden, dass sich Sauerstoff auch für die submarinen

[1]) Dr. F. Klemperer: Ueber Sauerstofftherapie in der Zeitschrift: Therapie der Gegenwart. Berlin 1901. — Dr. Dutremblay: Traitement du mal de mer par l'oxygène pur. Paris. — Derselbe: Sur l'emploi thérapeutique de l'oxygène pur. Paris. — Thompson, W. Gilman: The therapeutic value of oxygen inhalation. New York 1889. — Ein ausführlich zusammengestelltes Litteraturverzeichnis über den Sauerstoff in der Therapeutik befindet sich in der Broschüre: Sauerstoff in der Krankenpflege von Dr. K. Foss in Berlin, Fischers Verlag.

Boote, deren Mannschaft nur durch Mitnahme eines hinreichenden Sauerstoffvorrates längere Zeit unter Wasser verbleiben kann, sowie für die Taucher unentbehrlich gemacht hat.

Diese Verwendung von Sauerstoff für die Therapie ist für gewisse Wasserzersetzungsanlagen, welche für Eigenbedarf arbeiten, von Bedeutung, weil in solchen immer mehr Sauerstoff erzeugt, als verbraucht wird. Der Ueberschuss an Sauerstoff kann also unter Umständen zu hohem Preise verkauft werden, während man ihn sonst als wertlos müsste entweichen lassen.

Löten und Schweissen von Metallen mit Knallgas.

Die Temperatur der Knallgasflamme ist ausserordentlich hoch, weshalb sich die letztere für alle möglichen Löt- und Schweisszwecke in hohem Masse eignet. Die durch Verbrennung von Wasserstoff in reinem Sauerstoff theoretisch erreichbare Temperatur berechnet sich zu 6700° C.[1]). Durch Dissociation des entstehenden Wasserdampfes wird die Verbrennungstemperatur des Wasserstoffs in Sauerstoff jedoch auf 2500 bis 3000° C. erniedrigt, eine Temperatur, die demnach derjenigen des elektrischen Lichtbogens recht nahe kommt, und die immer noch genügt, Eisen, Stahl und Kupfer mit Leichtigkeit zu schmelzen. Es ist zu beachten, dass beim technischen Verbrennungsprozess das Knallgasgemisch nicht das der Theorie entsprechende Verhältnis von 2 Teilen Wasserstoff und 1 Teil Sauerstoff besitzt, sondern aus 3 bis 4 Teilen Wasserstoff und 1 Teil Sauerstoff besteht. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Flamme für Löt- und Schweisszwecke reduzierende Eigenschaften besitzen muss und überdies die atmosphärische Luft sich an der Verbrennung des Wasserstoffs beteiligt.

Das chemisch oder elektrolytisch gewonnene Knallgas hat für Löt- und Schweisszwecke besonders in jüngster Zeit eine ausgedehnte Verbreitung gefunden; daher werde ich mich bei diesem Kapitel etwas länger aufhalten.

Die Bleilötung erfordert keine besonders hohe Temperatur; anders verhält es sich hingegen mit Platin, Kupfer, Eisen, Bronze und anderen Metallen, bei denen, wie z. B. beim Eisen, zum elektrischen Flammenbogen (System Bernados, System Volter) oder zur direkten Erhitzung des Objektes durch den elektrischen Strom unter Wasser (System Lagrange und Hoho) gegriffen werden musste.

---

[1]) Neumann: Thermochemie. Braunschweig.



Beiden elektrischen Verfahren haften jedoch eine Anzahl Nachteile an, die beim Knallgasgebläse in Wegfall kommen, wie z. B.:

a) die vergleichsweise umständlichen und kostspieligen Einrichtungen und Manipulationen, da eine Akkumulatorenbatterie von bedeutender Kapazität zur Verfügung stehen muss;
b) die schwer zu regulierende, für einzelne Metalle zu hohe Temperatur des Flammenbogens;
c) gewisse Metalle erleiden durch die Behandlung mit dem elektrischen Flammenbogen wegen der mit Kohlenstoff gesättigten Flammenbogenatmosphäre eine mehr oder weniger ausgesprochene, ungünstige Veränderung ihrer Konstitution; Eisen z. B. wird glashart und ist nicht mehr bearbeitungsfähig, Kupfer nimmt eine poröse, schwammartige Struktur an.

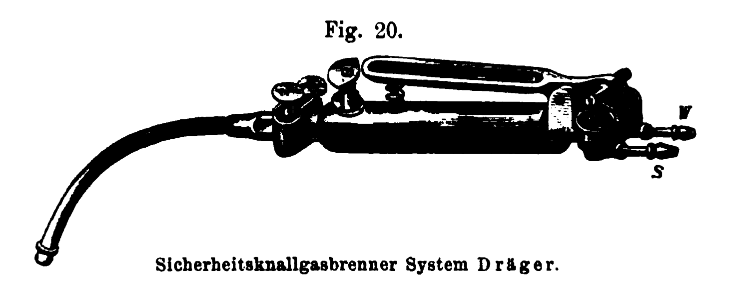
Eine Löt- oder Schweissoperation mit der Knallgasflamme ist sozusagen an jedem Orte und in sehr kurzer Zeit ausführbar und nicht mit besonderen Schwierigkeiten verbunden, da hiezu lediglich zwei Gasflaschen mit den zugehörigen Ventilen, sowie ein Lötrohr nötig sind. Der Flamme kann man nach Belieben reduzierende oder oxydierende Eigenschaften erteilen; ebenso können die gewünschte Temperatur und die Flammengrösse mit Leichtigkeit eingehalten werden. Die Handhabung eines Knallgasbrenners ist, ganz gleichgiltig, ob es sich um kleinere oder grössere Metallstücke handelt, unvergleichlich einfacher, als diejenige eines elektrischen Schweissapparates, ganz abgesehen von der bekannten Thatsache, dass das elektrische Verfahren ausserordentlich gesundheitsschädlich ist und auf dem Gesicht, falls dasselbe nicht ganz mit einer Maske geschützt worden ist, eigentümliche Verbrennungserscheinungen hervorruft.

Die **Bleilötung** wird bekanntlich ohne Zuhilfenahme eines Fluss- oder Bindemittels vorgenommen; hiezu bediente man sich früher der Luft-Wasserstoffflamme, wobei der Wasserstoff mit Zink und verdünnter Schwefelsäure erzeugt, und dem so bereiteten Gas atmosphärische Luft beigemengt wurde. In letzter Zeit kommen jedoch die Akkumulatorenfabriken immer mehr von diesem lästigen, unsauberen und vor allem unrationellen Verfahren ab, um zu dem elektrolytischen Knallgasbetrieb oder zu dem „trockenen Verfahren“ mit hochgespannten Gasen überzugehen (Montage ausser der Fabrik). Als unrationell muss die Luft-Wasserstoffflamme deshalb bezeichnet werden, weil die atmosphärische Luft bekanntlich nur zum fünften Teile aus Sauerstoff besteht und somit der in der Luft enthaltene Stickstoff unnütz miterhitzt werden muss, wodurch die Oekonomie des Verbrennungsprozesses enorm

verringert wird. Jetzt ist auch ersichtlich, dass die Zeitersparnis, die bei Benützung von Knallgas gegenüber der Luft-Wasserstoffflamme resultiert, ausserordentlich gross sein muss und z. B. bei grossen Akkumulatorentypen mit hohen und starken Fahnen bis zu 350 % beträgt.

Besondere Verdienste um die Einführung von Knallgas in Akkumulatorenfabriken hat sich Dr. Schmidt-Zürich[1]) erworben, der auch den Beleuchtungsversuchen mit Wasserstoff und Auerstrümpfen ein grosses Interesse zugewendet hat.

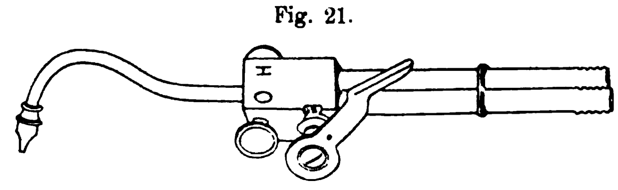
Fig. 20.



Sicherheitsknallgasbrenner System Dräger.

Um eine Vergeudung von Gas zu vermeiden, sind sogenannte „Sparhähne" im Gebrauch (Fig. 20 und 21), welche derart beschaffen sind, dass die Flamme selbstthätig gedrosselt wird, sobald man den Löthahn aus der Hand legt; hiebei wird die Sauerstoffzufuhr durch Zurückschnellen eines mit einer Feder versehenen, als Absperrventil wirkenden Hahnkükens ganz abgeschnitten, der Wasserstoff hingegen

Fig. 21.



„Sparhahn" für Bleilötung.

so gedrosselt, dass eben noch eine kleine, kaum sichtbare Flamme weiterbrennt.

Die Benützung eines derartigen Sparhahnes empfiehlt sich schon darum, weil der Sauerstoff (wenn es sich um verdichtete Gase handelt) annähernd dreimal so teuer ist als der Wasserstoff und es somit angezeigt ist, den Sauerstoffverbrauch auf ein Minimum zu beschränken.

Die Praxis hat darauf hingewiesen, dass die beiden Gase am zweckmässigsten erst kurz vor der Flamme gemischt werden; das

[1]) Vergl. C.A.E. 1900.

fertige Knallgasgemisch in einem Schlauche zum Lötrohr zu leiten, empfiehlt sich wegen des etwaigen Zurückschlagens der Flamme nicht.

Ein Knallgassicherheitsbrenner, wie er sich für grössere Lötarbeiten eignet, wird von H. Dräger in Lübeck in den Handel gebracht (Fig. 21).

Die Konstruktion dieses Mischhahnes ist insofern beachtungswert, als die beiden Gase aus einer gemeinsamen, mit zwei Durchbohrungen versehenen Düse ausströmen, wodurch eine saugende Wirkung und somit grösste Betriebssicherheit erzielt wird; eine eigentliche Mischkammer ist nicht vorhanden.

Die erheblichen Vorteile, welchen das „trockene Verfahren" seine Einführung überall dort verdankt hat, wo Bleilötungen (auch in Schwefelsäure- und Cellulosefabriken) auszuführen sind, können kurz wie folgt zusammengefasst werden:

1. weitaus reinlichere und einfachere Handhabung der nötigen Apparate;
2. Hilfsmannschaft für die Bedienung der Luftkessel und Zinkbeschickung der Wasserstoffentwickler kommt in Wegfall;
3. absolute Gefahrlosigkeit der Gasflaschen, bezw. der Hantierung mit denselben;
4. infolge der grossen Reinheit der Gase und wegen der grossen Flammenhitze sind die Lötstellen zuverlässiger und 2- bis 3mal schneller zu bewerkstelligen, als mit dem früheren Verfahren;
5. die Arbeiter werden weder durch Säuredünste der Wasserstoffentwickler noch durch Verbrennungsprodukte belästigt, schonen Kleider und Schuhe und arbeiten schon aus diesen Gründen mit dem trockenen Verfahren sehr gern;
6. wird die nämliche Arbeit zu Grunde gelegt, so ist das „trockene Verfahren" sehr erheblich billiger, als das bisher allgemein gebrauchte chemische Verfahren[1]).

Das Löten von Aluminium hat bis auf die jüngste Zeit erhebliche Schwierigkeiten bereitet, geht jedoch mit der wasserstoffreichen Knallgasflamme leicht von statten. Man bedient sich hiezu eines (am besten platinierten) kupfernen Hammers, welcher mit der zu behandelnden Stelle möglichst gleichzeitig erwärmt wird. Wenn die betreffende Stelle anfängt weich zu werden, wird ein Aluminiumdraht von entsprechender Dicke unter die Flamme gebracht, welche denselben in wenigen Sekunden zum Schmelzen bringt. Es sind bereits

[1]) Siehe auch Z. f. E. Wien 1901, Heft 18. — M. U. Schoop: Ueber das Bleilöten mit komprimiertem Wasserstoff und Sauerstoff.

Apparate für Aluminiumlötung käuflich, die ein rasches und bequemes Arbeiten ermöglichen.

Den mit der Knallgasflamme hergestellten Aluminiumlötnähten wird grosse Widerstandsfähigkeit nachgerühmt.

Versuche, defekte Röhrenkessel vermittelst der Knallgasflamme zu reparieren, sind mit gutem Erfolge von der Société anonyme l'Oxhydrique in Brüssel vorgenommen worden. Es genügt, das schadhafte Stück durch ein neues zu ersetzen, welches ohne weiteres, d. h. ohne Fluss- und Bindemittel angelötet werden kann. Ausser einer angeblichen Ersparnis von 50 % gegenüber dem alten Lötverfahren mit Kupferschlaglot ergibt sich bei der neuen Methode der Vorteil, dass die eigentümliche, öfter beobachtete Korrosion aufhört, die wahrscheinlich auf die Gegenwart verschiedener Metalle in mehr oder weniger salzhaltigem Wasser und die dadurch hervorgerufenen elektrischen Lokalströme zurückzuführen ist.

Eine weitere Anwendung findet das Knallgasgebläse wegen der sehr hohen Verbrennungstemperatur für die Ausbesserung von Gussfehlern von grösseren und kleineren Metallstücken. Handelt es sich z. B. um die Ausbesserung einer Gussblase in einem Façoneisenstück, so wird die betreffende Stelle mit der Knallgasflamme stark erwärmt, und nun die Blase mit weichem, vorher flüssig gemachtem Eisen ausgegossen. Gänzlich wertlose Stücke können auf diese Weise wieder gebrauchsfähig gemacht werden.

Allerjüngsten Datums sind die Versuche, welche sich auf die direkte Verwendung des Knallgasgebläses im Hochofenbetrieb beziehen[1]). Während früher das Aufschmelzen des Abstichloches bei Versetzungen mehrere Stunden in Anspruch nahm, selbst mit dem elektrischen Lichtbogen noch einen Zeitaufwand von 20 Minuten erforderte, kann nach Dr. Michaelis dieselbe Arbeit mittels eines entsprechend dimensionierten Lötbrenners in 3 Minuten bewerkstelligt werden. Dabei ist die Anlage ausserordentlich einfach, da nichts weiter notwendig ist, als zwei Stahlflaschen, die weder Platz noch kostspielige Aenderungen beanspruchen.

In den Werken von Krupp und den Kaiserlichen Werften werden Panzerplatten an den Stellen, wo später Nietbolzen eingesetzt werden sollen, mit der Knallgasflamme erhitzt und warm angebohrt[2]).

Die Verwendung von elektrolytisch oder chemisch gewonnenem Wasserstoff für die Aëronautik ist bekannt. Der elektrolytische

[1]) Siehe Zeitschrift für komprimierte und flüssige Gase, Bd. 4, Nr. 10 u. 11; Vortrag von Dr. L. Michaelis-Berlin.

[2]) l. c.

Wasserstoff wiegt nur ca. 4/5 des als chemisches Nebenprodukt gewonnenen Wasserstoffes und ist weit billiger, als aus Zink-Schwefelsäure dargestellter Wasserstoff. Als Nachteil des reinen Wasserstoffes für Ballonfüllungen ist seine absolute Geruchlosigkeit zu bezeichnen; jedoch ist dem dadurch leicht abzuhelfen, dass man demselben geringe Quantitäten Merkaptan beimengt. Elektrolytischer Wasserstoff kommt für aëronautische Zwecke in Verwendung in Chalais-Meudon, Rom und in der Schweiz.

Verwendung des Knallgasgebläses in Glashüttenbetrieben.

Dieses Verwendungsgebiet für Knallgas ist vielleicht dasjenige, das die grösste Zukunft hat. Mit dem Knallgasbrenner können bleihaltige Gläser behandelt werden, ohne eine Reduzierung des Bleies zu befürchten, und sehr harte Glassorten schmelzen hiebei mit derselben Leichtigkeit wie weiche. Der Umstand, dass durch die Knallgasflamme eine Verunreinigung des Glases verhütet werden kann, macht den Knallgasbetrieb in Glasfabriken besonders dann ausserordentlich geeignet, wenn es sich um krystallhelles, feines Glas handelt.

Es hält nicht schwer, zu beweisen, dass der Knallgasbetrieb für die Glasfabrikation dem Kohlenofen- oder Gasofenbetrieb auch bezüglich der Wirtschaftlichkeit überlegen ist; allerdings kann der Nutzeffekt dieser letzteren Betriebe durch Benützung von Siemensschen Regenerativöfen etwas erhöht werden. Aber auch da gehen 2400 Kal. (bezogen auf den theoretischen Verbrennungsprozess) nur durch die Destillationsarbeit verloren, die darin besteht, den Kohlenstoff in Kohlenoxyd überzuführen.

Eine in der Glashütte Saint-Gobain vorgenommene Analyse von Regenerativgas hatte folgendes Ergebnis (bezogen auf Volumen):

23,0	CO	33,30 % verbrennbare Gase,
8,0	H	
2,30	CH_4	
4,20	CO_2	66,70 % schädliche bezw. unverbrennbare Gase.
62,50	N	

Die 66,7 % schädlicher Gase müssen somit zwecklos miterhitzt werden.

Hinsichtlich der elektrischen Glasöfen ist zu bemerken, dass denselben, abgesehen von dem im allgemeinen nur mittelgrossen Nutzeffekt, gewisse Nachteile anhaften, die in dem grossen Verschleiss von Kohlen und Kohlenhaltern und der möglichen Verunreinigung des Produktes durch die Kohle oder die Kohlenasche bestehen.

In Tivoli bei Rom gemachte exakte Versuche haben ergeben, dass 1 cbm Knallgas der Produktion von 1 kg feinstem Krystallglas entspricht. Für Knallgasbetrieb eingerichtete Oefen kosten bedeutend weniger als solche für andere Betriebe. Eine elektrolytische Anlage von 1000 PS (Wasserkraft) kann die Kilowattstunde zu 1 Pfg. erzeugen, Tag- und Nachtbetrieb vorausgesetzt. Diese Anlage würde in 24 Stunden 4200 cbm Knallgas liefern können, welche einer Tagesleistung von 4 Tonnen Glas entsprechen. Der Kubikmeter Knallgas käme also auf 0,035 M. zu stehen und die Erzeugung von 1 kg Glas aus dem Rohmaterial ebenfalls auf 0,035 M. (rund 50 % des jetzigen Selbstkostenpreises). Von grossem Interesse ist die Heranziehung des Knallgasgebläses zur Herstellung grosser Glasgefässe und Glaströge. Die durch Blasen erhaltenen Glasgefässe sind meist nicht von tadelloser Beschaffenheit, fallen ungleichmässig aus und zeigen infolge von Spannungen Tendenz zum Springen. Legt man aber fünf aneinanderstossende gleichdicke Glasplatten auf einen Eisenkern von entsprechender Form, so kann man die Ränder der Glasplatten nach erfolgter Anwärmung leicht mit der Knallgasflamme verschmelzen. Dieser Art hergestellte Glasgefässe sind gleichmässig starkwandig und werden in England für Akkumulatoren, chemische Zwecke u. s. f. verwendet.

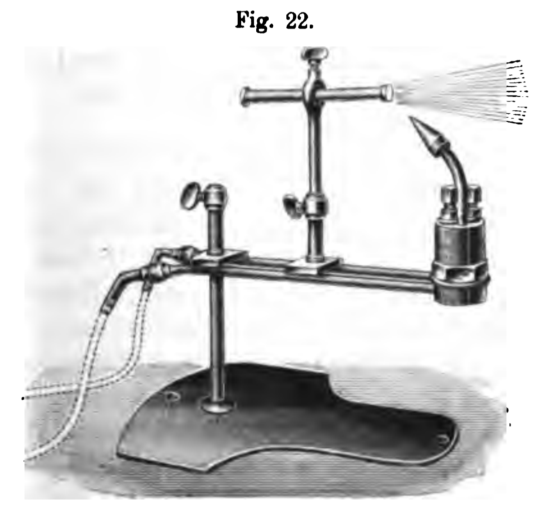
Wasserstoff mit und ohne reinen Sauerstoff für Beleuchtungszwecke.

Bekanntlich ist die reine Wasserstoffflamme nicht leuchtend und wird es erst, wenn man den Wasserstoff vorher mehr oder weniger mit Kohlenstoffen dadurch sättigt, dass man ihn z. B. durch Benzin streichen lässt oder dem Wasserstoff Aether-, Petroleum- oder Benzindämpfe beimengt. Eine Bedeutung hat jedoch derartig behandelter Wasserstoff bis jetzt meines Wissens nicht erlangt. Sehr verbreitet dagegen ist das von dem englischen Marineoffizier Drummont erfundene und nach ihm benannte Kalklicht, bei welchem die Knallgasflamme auf ein Stück Kalk oder Kreide oder eine Zirkonplatte gerichtet wird (Fig. 22). Das Drummontsche Kalklicht wird viel für Projektion, Kinematographen, militärische Zwecke u. s. f. angewendet und ist im Prinzipe dem Auerlicht ähnlich.

Der Gedanke liegt nahe, Auerbrenner mit Wasserstoff unter Zuhilfenahme atmosphärischer Luft zu betreiben; thatsächlich sind diesbezügliche Versuche sehr günstig ausgefallen, und man könnte diesem

Beleuchtungsmodus grosse Aussicht auf praktische Verbreitung zusprechen, sofern es noch gelingt, die Ventilfrage in befriedigender Weise zu lösen. Eine gefüllte Wasserstoffbombe ist nämlich nicht ohne weiteres mit einem Gasometer zu vergleichen, der zu gleicher Zeit ohne jegliche Nachregulierung jede beliebige Anzahl von Flammen zu speisen vermag. Vielmehr hängt bei dem komprimierten Wasserstoff die in der Zeiteinheit ausströmende Gasmenge von der Einstellung des Reduzierventiles ab. Sind beispielsweise zehn Flammen angeschlossen, von denen fünf gelöscht werden sollen, so würde nichtsdestoweniger dieselbe Gasmenge in die weiterbrennenden fünf Flammen strömen,

Fig. 22.



Stativ für Drummontsches Kalklicht.

wodurch die Brenner ruiniert würden. Unter Einschaltung eines dem Gasverbrauch angepassten Gasbehälters, dem gleichsam die Funktion eines Pufferapparates zukäme, könnte allerdings die Beleuchtung mit Wasserstoff und Glühstrümpfen recht gut in Verwendung kommen und mit der Zeit dem Acetylen ein gefährlicher Konkurrent werden. Explosionen, wie solche häufig bei Acetylenanlagen zu konstatieren sind, sind bei Wasserstoffbeleuchtungsanlagen, soweit menschliche Voraussicht reicht, absolut ausgeschlossen.

Für das Wasserstofflicht spricht ferner, dass es gesundheitlich das beste Gaslicht ist, da es weniger Sauerstoff verbraucht als andere Gase und keine Kohlensäure erzeugt. Nach Versuchen von Dr. Schmidt[1])

---

[1]) Z. f. Elektrochemie 1900, Heft 20.

strömt der Wasserstoff zweckmässig unter ca. ½ Atm. aus, wobei für 100 NK und für die Stunde nur 25 l Wasserstoff verbraucht werden.

Ueber die Verwendung von Wasserstoff und Sauerstoff in technischen und wissenschaftlichen Laboratorien halte ich mich nicht länger auf und bemerke nur, dass Sauerstoff viel für Analysen organischer Stoffe, für Oxydationsprozesse, für Gasanalysen, für Spektralanalysen und häufig auch in physiologischen Versuchsstationen gebraucht wird.

Lord Kelvin soll einmal behauptet haben, dass in vier, höchstens aber in fünf Jahrhunderten die kommenden Geschlechter kaum mehr genügend Sauerstoff zum Leben haben werden. Zu Gunsten unserer Nachkommen wollen wir hoffen, dass die Berechnung des berühmten Gelehrten eine irrtümliche ist und die für den Sauerstofffabrikanten goldenen Zeiten überhaupt nicht kommen, wo der Lebensurquell, der Sauerstoff, in Flaschen gezogen und verkauft wird.

Motoren mit Wasserstoffbetrieb.

Gasmotoren vom gewöhnlichen Typus für Leuchtgasbetrieb können auch ganz gut mit Wasserstoff betrieben werden; die PS-Stunde verbraucht je nach der Konstruktion, Grösse und Güte des Motors zwischen 0,7 und 0,9 cbm Wasserstoff. Natürlich ist der Betrieb mit Wasserstoff vorderhand noch erheblich teurer als mit Leuchtgas; für Automobilzwecke jedoch könnte der Wasserstoff gewisse Vorteile bieten, da er auf 300 Atm. komprimiert werden kann, was mit Leuchtgas ausgeschlossen ist. Eine Wasserstoffbombe à 300 Atm. wiegt durchschnittlich 4 kg pro PS und Stunde, eine Bombe à 120 Atm. 8 kg. Eine derartige Stahlflasche ist ebensogut ein Energiereservoir als der Bleiakkumulator; nur dürfte der Gasakkumulator dem Bleiakkumulator bezüglich der Solidität, der Billigkeit und Leichtigkeit überlegen sein. Was den Nutzeffekt anbetrifft, so ist der Gasakkumulator im Nachteil, indem die Energieaufspeicherung von Wasserstoff natürlich mit mehreren Energietransformationen verbunden ist.

Ob Versuche mit Wasserstoff in dem angedeuteten Sinne gemacht worden sind, ist mir nicht bekannt; ich muss allerdings offen bekennen, dass ich für das Vergnügen danken würde, eine Pläsier- oder Fernfahrt mitzumachen und dabei auf 300 Atm. zu sitzen.

Andere Verwendungsarten.

a) Die Gewinnung von Calciumcarbid.

Zur Bildung des Calciumcarbids sind Temperaturen von über 2000 ° C. erforderlich, währenddem eine Hitze von über 3000 ° C. das



bereits gebildete Carbid wieder zerstört. Dies ist einer der Gründe, warum die Carbidausbeute im elektrischen Ofen nur etwa 50% der theoretischen beträgt, da nämlich in unmittelbarer Nähe der Kohlenelektroden höhere Temperaturen herrschen, als sie für Bildung und Erhaltung des Carbids nötig sind.

Mit dem Knallgasgebläse ist die gewünschte Reaktionstemperatur leicht herzustellen und durch die ganze Charge eines Ofens innezuhalten.

Voraussetzung für die Lebensfähigkeit dieses Verfahrens, sowie der unter b) und c) folgenden Methoden, ist billiger Gestehungspreis von Wasserstoff und Sauerstoff.

b) Erzeugung von Schwefelsäureanhydrid und von Schwefelsäure.

Nach dem Verfahren von C. Winkler verbrennt schweflige Säure mit reinem Sauerstoff und bei Berührung mit Platina-Asbest sofort zu Schwefeltrioxyd (Anhydrid). Dieses letztere, mit ca. 22 Gewichtsprozent Wasser vermischt, liefert 90%ige Schwefelsäure.

c) Entkohlung von Eisen.

Bekanntlich wird behufs Stahlerzeugung in der Bessemerbirne über geschmolzenes Gusseisen atmosphärische Luft geblasen. Derselbe Effekt, nur viel wirtschaftlicher und in kürzerer Zeit, wird durch Einblasen von reinem Sauerstoff erzielt. Der so erzeugte Stahl ist nicht nur heisser und gussfähiger, sondern lässt sich auch leichter mit anderen Metallen verbinden.

Der Vollständigkeit halber mögen noch folgende Verwendungen für Sauerstoff Erwähnung finden[1]):

Fisch- und Austerntransporte, Verdicken von Oelen und Sikkativen, Verbesserung von alkoholischen Getränken, insbesondere von Weinen und Liquören, Bleicherei, Gerberei u. a. m.

---

[1]) A. M. Villon: Les emplois industriels, médicaux et hygiéniques de l'Oxygène et de l'ozone; Paris 1892. — Les applications du gas oxhydrique; Société anonyme: l'Oxhydrique à Bruxelles.

Anhang.

1 Coulomb entspricht 0,000010384 g oder 0,000116 l Wasserstoff
1 Ampèrestunde „ 0,03736 „ „ 0,4176 „ „

Ein Elektrolyseur nach System Garuti entwickelt bei einer Stromstärke von 100 Ampère und in 1 Stunde 3,730482 g Wasserstoff oder 3,730 l Wasserstoff.

1 g Wasserstoff entspricht 1,117 l Wasserstoff
1 l „ „ 0,08946 g „

Als leicht zu behaltende Regel merke man sich, dass

10 l Wasserstoff nicht ganz 1 g wiegen.

1 Flasche mit 6 cbm verdichtetem Wasserstoff besitzt ein Gewicht von

73 kg (Eigengewicht) plus 0,636 kg Gasgewicht.

Um sich durch Wägung zu überzeugen, ob eine Wasserstoffflasche voll oder leer sei, muss man somit eine ziemlich genaue Wage zur Verfügung haben.

Sauerstoff ist 16mal schwerer als Wasserstoff; der elektrische Strom zersetzt in der Zeiteinheit $^1/_2$mal so viel Sauerstoff als Wasserstoff, bezogen auf das Volumen, und 8mal so viel Sauerstoff als Wasserstoff, bezogen auf das Gewicht.

Betriebsdaten der Anlage Tivoli bei Rom.

1 PS-Stunde effektiv an den Klemmen des Transformators liefert

0,086 cbm Wasserstoff und 0,043 cbm Sauerstoff.

100 PS-Stunden liefern pro Arbeitsschicht von 11,5 Stunden

98,5 cbm Wasserstoff und 49,25 cbm Sauerstoff.

Gasausbeute, bezogen auf die den Elektrolyseuren zugeführte Energie. (Aus den Betriebsergebnissen der Anlage in Brüssel.) 21 Kilowatt liefern pro Stunde

3,360 cbm Wasserstoff und 1,680 cbm Sauerstoff,

d. h. 4,15 Kilowattstunden entsprechen 1 cbm Knallgas. Pro induzierte PS-Stunde erhält man somit

0,12 cbm Wasserstoff und 0,06 cbm Sauerstoff.

Die elektrische Beleuchtung der Eisenbahnzüge.

Von

Ingenieur **Adolf Prasch,**

k. k. Regierungsrat und Eisenbahnoberinspektor a. D.

Mit 50 Abbildungen.

Die Entwickelung der elektrischen Beleuchtung datiert von dem Zeitpunkte, zu welchem es gelungen war, das Licht beliebig zu unterteilen, und gebührt hieran das Verdienst Edison und Swan, welchen es im Jahre 1879 fast gleichzeitig gelungen war, eine brauchbare Glühlampe unter Anwendung von in evakuierten Glasbirnen eingekitteten bezw. eingeschmolzenen Kohlenfäden zu schaffen.

Die grosse Stetigkeit des von diesen Lampen ausgestrahlten Lichtes, die gelbliche Färbung desselben, welche die beleuchteten Gegenstände im Gegensatze zum Bogenlichte in einem warmen Ton erscheinen liess, machten diese Beleuchtungskörper namentlich für die Innenbeleuchtung und insbesondere für die Beleuchtung von Wohnräumen geeignet.

Die Glühlampe hat wohl im Laufe der Jahre bedeutende Verbesserungen erfahren, und es ist namentlich gelungen, dem Kohlenfaden eine erhöhte Festigkeit zu verleihen; allein in Bezug auf das dieser Lampe zu Grunde liegende Prinzip, sowie auf die äussere Form sind kaum nennenswerte Wandlungen zu verzeichnen, so dass dem Laien der Unterschied zwischen einer modernen Lampe und einer Lampe von anno dazumal kaum begreiflich zu machen sein wird.

Die vielfachen Versuche, den doch immerhin wenig dauerhaften Kohlenfaden durch andere widerstandsfähigere Körper zu ersetzen, haben bisher wohl zu keinem günstigen Ergebnisse geführt. Es scheint jedoch in dieser Richtung ein Umschwung zu erwarten zu sein, indem der durch die Erfindung der Gasglühstrümpfe berühmt ge-

wordene Chemiker Auer von Welsbach sich in neuerer Zeit mit der Verbesserung der Glühlampe eingehend befasste, und mit seiner Osmiumlampe nunmehr so weit vorgeschritten sein soll, dass selbe demnächst zur allgemeinen Verwertung gelangen kann. Mit dieser Lampe, die ähnlich wie die Nernstlampe auf Verwertung von refraktionären Körpern beruht, die erst bei erhöhter Temperatur ihren Leitungswiderstand vermindern, dafür aber eine grössere Leuchtkraft aufweisen, soll zwar nicht die Lebensdauer der Lampe erhöht, hingegen der Energiebedarf wesentlich herabgemindert werden. Nach den bisherigen Mitteilungen soll dieser Energiebedarf nur mehr 1½ Watt für die Normalkerze betragen, wohingegen dieselbe dermalen normal 3 bis 3½ Watt beträgt.

Das Auftauchen der Glühlampe, wiewohl selbe in den Grundzügen bereits vor vielen Jahren erdacht war, liess nun bald das Augenmerk darauf richten, dieselbe auch für die Beleuchtung der Innenräume der Eisenbahnwaggons nutzbringend zu verwerten.

Anstoss hierzu gaben erstens die absolute Ruhe des von denselben ausgeströmten Lichtes, welches selbst bei geringer Lichtintensität dem Reisenden die Möglichkeit eröffnet, die schlaflose Zeit zum Lesen zu verwerten, und zweitens die absolute Ungefährlichkeit dieser Beleuchtungsart.

Allein die praktische Anwendung derselben ermöglichte erst die Erfindung von Faure, welcher, auf Plantés Untersuchungen weiterbauend, im Jahre 1881, zur Zeit der internationalen Elektrizitätsausstellung in Paris, mit seiner neuen Sammlerzelle vor die Oeffentlichkeit trat.

Die Möglichkeit, elektrische Energie aufzuspeichern, wurde, wie bekannt, durch Planté schon vor dem Jahre 1870 nachgewiesen. Er nahm zwei Bleistreifen, tauchte selbe in ein mit verdünnter Schwefelsäure gefülltes Gefäss und setzte selbe der elektrolytischen Wirkung eines galvanischen Stromes aus.

An dem mit dem positiven Pole der Elektrizitätsquelle verbundenen Bleistreifen schied sich Bleihyperoxyd aus, während der mit dem negativen Pole verbundene Bleistreifen chemisch unverändert blieb, dagegen Riefen und Streifen zeigte, welche von einer Wanderung des Bleis zum positiven Pole Zeugnis gaben. Löste man nun die Verbindung mit der Elektrizitätsquelle und verband hierauf die Pole durch einen Leiter, so konnte durch ein geeignetes Messinstrument das Zirkulieren eines kräftigen galvanischen Stromes festgestellt werden. Dieser Strom war jedoch von keiner langen Dauer, und musste die

Prozedur des Ladens und Entladens der Bleistreifen häufig wiederholt werden, um praktisch brauchbare Elektrizitätsmengen auf diesem Wege aufzuspeichern.

Erst wenn diese Plantéelemente, mit welchem Namen selbe bezeichnet wurden, hinreichend formiert waren, konnte man daran denken, aus selben nach erfolgter Ladung ausreichende Elektrizitätsmengen herauszuziehen.

Das Formieren war aber an und für sich namentlich zu Beginn des Aufschwunges der Elektrotechnik eine sehr kostspielige Sache, und diese Erwägung führte Faure zu dem Versuche, diese Arbeit des Formierens dadurch zu umgehen bezw. zu verringern, dass er an Stelle der Bleistreifen oder Platten Bleirahmen nahm und selbe mit Pasten von Bleioxyden ausfüllte. Die gehegten Erwartungen erfüllten sich nun nahezu vollkommen, und glaubte man daher eines der Endziele der Elektrotechnik, Elektrizität in beliebigen Mengen aufspeichern zu können, nunmehr endgiltig erreicht zu haben.

Durch diese Neuerung war aber erst der Weg für die elektrische Zugsbeleuchtung geebnet, denn eine der Hauptschwierigkeiten, auch für die Zeit des Stillstands des Zuges, ebenso wie der langsamen Fahrt, elektrischen Strom zur Speisung der Lampen zur Verfügung zu haben, schien dadurch überwunden.

Allerdings hatte Sedlaczek für seine Lokomotivlampe zur Beleuchtung des Bahnkörpers schon früher gezeigt, dass sich diese Schwierigkeit dadurch überwinden lässt, dass man an die Lokomotive eine kleine schnelllaufende Dampfmaschiene, welche mit der stromerzeugenden Dynamo direkt gekuppelt wird, anmontiert und dieselbe von dem Dampfe des Lokomotivkessels speist.

Dieser Ausweg hatte sich aber keiner besonders freundlichen Aufnahme zu erfreuen und dürfte dies mit ein Grund sein, dass die von Sedlaczek konstruierte Lokomotivlampe trotz tadellos ruhigem Brennen und trotz Widerstandsfähigkeit gegen alle von aussen einwirkenden Stösse sich nicht für die Dauer in den praktischen Betrieb einzubürgern vermochte.

Für die Innenbeleuchtung der Waggons hätte aber eine derartige Anordnung in zweifacher Hinsicht bedeutende Schwierigkeiten verursacht. Das Krafterfordernis für die Beleuchtung eines längeren Zuges mit seinen zahlreichen Glühlampen ist nämlich in diesem Falle um ein Mehrfaches grösser als jenes, wo nur eine einzige Bogenlampe von 500 bis 1000 Normalkerzen mit Strom zu versorgen ist. Dampfmaschine und Dynamo müssen daher und zwar für den Kraft- bezw.

Strombedarf des längsten Zuges ausreichend bemessen sein und erlangen dadurch solche Dimensionen, dass selbe bei dem beschränkten Raume der Lokomotiven nicht mehr auf denselben untergebracht werden können. Auch haben derlei Dampfmaschinen, welche nur rotierende sein können, einen sehr ungünstigen Nutzeffekt und gesellt sich hierzu der Nachteil, dass selbe infolge der ungleichen Zusammensetzung der Züge in den wenigsten Fällen voll ausgenützt zu werden vermögen.

Als eines der schwerstwiegenden Bedenken gegen eine solche Anordnung ist jedoch die Notwendigkeit anzuführen, die Speiseleitungen längs des ganzen Zuges zu führen. Da die einzelnen Wagen nach Bedarf von dem Zuge abgestellt bezw. an denselben angehängt werden müssen, können diese Speiseleitungen nicht als fortlaufendes Ganzes gezogen, sondern es muss die Verbindung von Wagen zu Wagen durch Leitungskuppelungen hergestellt werden. Diese Verbindung muss eine sehr solide sein, darf sich durch die fortwährenden Erschütterungen, denen sie während der Fahrt des Zuges ununterbrochen ausgesetzt ist, nicht lockern, und soll die Herstellung derselben mit einem einzigen und einfachen Handgriffe erfolgen können.

Eine zufriedenstellende Lösung dieser Aufgabe ist bisher noch nicht gefunden, und bildet eben diese Kuppelung noch einen der Hauptnachteile der elektrischen Interkommunikationssignale.

Ausserdem ist die Zahl der zwischen Wagen und Wagen herzustellenden Kuppelungen bereits eine so grosse, dass jede Vermehrung derselben schon mit Rücksicht darauf, dass die Durchführung der Kuppelungsarbeit nur untergeordneten Organen anvertraut werden kann, sicher nichts weniger als freundlich begrüsst wird.

Um eine anstandslose, nicht mit Schwierigkeiten kämpfende elektrische Zugsbeleuchtung zu erhalten, war es notwendig, für jeden Wagen eine besondere Elektrizitätsquelle in Anwendung zu bringen, welche nunmehr mit der Erfindung Faures gefunden zu sein schien.

Thatsächlich wurden bereits im Jahre 1882 auf der Linie London—Brighton und im Jahre 1883 von de Calo auf der Semmeringbahn diesbezügliche Versuche durchgeführt, die jedoch zu keinem günstigen Ergebnisse führten und deshalb bald aufgegeben wurden.

Wie auch für viele andere Betriebe hatten sich hier die Akkumulatoren unzuverlässig erwiesen. Es kann nicht Gegenstand sein, auf die Grundursachen dieser Unzuverlässigkeit der Akkumulatoren zur damaligen Zeit näher einzugehen. Dieselben dürfen wohl in der teil-

weisen Mangelhaftigkeit des damaligen Fabrikates, mehr aber noch in der Unkenntnis der Behandlungsweise der Akkumulatoren, sowie weiters darin gelegen gewesen sein, dass man die Anforderungen zu hoch spannte, und dieselben dadurch derart in Misskredit brachte, dass heute noch in vielen Kreisen ein gewisses Misstrauen gegen die Anwendung derselben besteht.

Als man jedoch, gestützt auf die mittlerweile gewonnenen Erfahrungen, die Fabrikation verbesserte, die Konstruktion den verschiedenartigen Bedürfnissen immer mehr anzupassen verstand und auch die Grenzen der Inanspruchnahme derselben genau kennen lernte, wodurch sich deren Haltbarkeit und Wirksamkeit bedeutend verbesserte, war neuerdings der Zeitpunkt gekommen, der Frage der elektrischen Zugsbeleuchtung näher zu treten.

Auf grösseren Bahnen begegnet jedoch die Aenderung der bestehenden Beleuchtungsmethoden grossen Schwierigkeiten, da die Umwandlung des Wagenparkes auf die neue Beleuchtungsart mit grossen Auslagen verbunden ist und sich auch nicht mit einem Schlage, sondern nur successive durchführen lässt, so dass für ziemlich lange Dauer mit einem gemischten Betriebe gerechnet werden muss.

Zieht man ferner in Betracht, dass die alten Einrichtungen hierdurch entwertet werden und nur mehr als Altmateriale Verwendung finden können, so wird man es leicht begreiflich finden, dass die Eisenbahngesellschaften, die doch in erster Linie Erwerbsgesellschaften sind, im grossen und ganzen der elektrischen Beleuchtung nicht freundlich entgegenkommen und sich nur für besondere Fälle, wie beispielsweise Luxuszüge, zu deren Einführung entschliessen.

Es müssen eben besondere Fälle und äussere Zwangslagen hinzutreten, um diese Anstalten zu einer Aenderung ihrer Einrichtungen zu zwingen.

Wir finden daher die Anwendung der elektrischen Beleuchtung nur dort allgemeiner verbreitet, wo sich, wie bei kleineren Bahnen, die Erbauung eigener Oelgasanlagen nicht lohnt, und eine andere Beleuchtungsart wie mit Rüböl oder Petroleum nicht gestattet wird, oder dort, wo die Bahnen infolge gesetzlicher Bestimmungen zu einer Umwandlung ihrer Beleuchtungsart gezwungen wurden.

Ein Beispiel der ersteren Art bildet die Lokalbahn Novarra—Seregno bei Mailand, welche die elektrische Beleuchtung am längsten unter allen Bahnen und zwar schon seit dem Jahre 1885 im Betriebe hat. Dieselbe hatte anfänglich wegen des Mangels von den Anforderungen entsprechenden Akkumulatoren vielfach mit Schwierig-

keiten zu kämpfen. Durch die Einführung von Tudorakkumulatoren waren dieselben mit einem Schlage beseitigt.

Als Beispiel der zweiten Art können die Schweizerbahnen dienen, von denen nunmehr die Jura—Simplonbahn die elektrische Beleuchtung für ihren gesamten Wagenpark zur Einführung gebracht hat, sich aber hierzu nur infolge eines Bundesgesetzes entschloss, welches den Schweizer Bahnen die allgemeine Einführung einer besseren Beleuchtung als der Oelbeleuchtung zur Pflicht machte.

Es zeigt sich bei der Jura—Simplonbahn und bei der Gotthardbahn am deutlichsten, dass sich die Bahnen bei Einführung eines neuen Betriebes nur von ihren Interessen leiten lassen und andere Rücksichten für sie nicht massgebend sind. Auch die Gotthardbahn hat fast gleichzeitig mit der Jura-Simplonbahn mit der elektrischen Beleuchtung der Wagen Versuche gemacht. Diese Versuche führten aber zu einem negativen Ergebnisse, während die Versuche der Jura—Simplonbahn so günstig ausfielen, dass sich selbe zur allgemeinen Beleuchtung ihres Wagenparkes mit elektrischen Glühlampen entschloss. Diese beiden so eng verbundenen Bahnen hätten nun ihre gegenseitigen Erfahrungen austauschen können, aber es geschah dies nicht, und zwar aus dem einfachen Grunde, weil die Gotthardbahn ihren Wagenpark bereits früher für Oel- oder Fettgasbeleuchtung einrichten liess, und sohin, da selbe von dem erwähnten Gesetze nicht betroffen war, keinen Anlass fühlte, mit der bereits eingeführten Beleuchtungsart zu brechen.

Bei den Königl. Württembergischen Staatsbahnen wurden beinahe zu gleicher Zeit, es war dies im Jahre 1890, eingehende Versuche mit der elektrischen Beleuchtung auf der Strecke Stuttgart—Hall durchgeführt, allein die Bahnverwaltung sah sich, noch ehe sie mit ihren Versuchen zu Ende war, gezwungen, sich für eine der beiden Beleuchtungsarten, Oelgas oder Elektrizität, zu entscheiden, weil ihr die Regierung die baldigste Aenderung der bisherigen mangelhaften Rübölbeleuchtung anbefahl. Wäre damals dieser äussere Zwang nicht gewesen, so hätte man, da die Verwaltung der elektrischen Beleuchtung sympathisch gegenüberstand, eine umfangreichere Verwertung des elektrischen Lichtes für gedachte Zwecke erhoffen dürfen.

Wiewohl nun die Möglichkeit der elektrischen Beleuchtung der Eisenbahnzüge bereits anerkannt war, die Vorzüge derselben von dem Publikum in gebührendem Masse geschätzt wurden, und der Wert derselben, wie aus einem aus dem Jahre 1890 stammenden Berichte des Generaldirektors der Eisenbahnen des Kaplandes hervorgeht, auch

seitens vereinzelter Verwaltungen anerkannt wurde, so vermochte diese Beleuchtungsart seit dieser Zeit dennoch keine bedeutenden Fortschritte aufzuweisen.

Wie weit sich nun die elektrische Beleuchtung auf den südafrikanischen Bahnen einzubürgern vermochte, konnte leider nicht eruiert werden, doch dürfte es hier von Interesse sein, diesen Bericht hier auszugsweise kurz zu reproduzieren. In demselben heisst es, dass sich die elektrische Beleuchtung auf den Wagen der Wynbergstrecke und der Expresszüge, was den Komfort der Reisenden und die Sicherheit betrifft, als ein grosser Erfolg erwiesen hat, weshalb gleichzeitig beantragt wird, wegen der Gefahren, welche die Oelbeleuchtung mit sich bringt, und welche bereits Ursache verschiedener das Leben der Reisenden und die Wagen gefährdender Unfälle war, die Anwendung der elektrischen Beleuchtung auf allen drei ihm unterstehenden Eisenbahnen einzuführen.

Was nun das Gefahrsmoment der bisherigen, nach Beseitigung der früher in Anwendung gewesenen Rübölbeleuchtung, fast allgemein eingeführten Oelgasbeleuchtung betrifft, so weist eine Reihe von Unfällen darauf hin, dass selbes nicht unterschätzt werden darf.

Direkte durch die Oelgasbeleuchtung verursachte Unfälle geringerer Art lassen sich zwar sehr schwer nachweisen, aber eine Reihe von Unfällen, zwar durch andere Ursachen herbeigeführt, aber dieselben ungemein erschwerend, weisen darauf hin, dass diese Gefahren thatsächlich vorhanden sind.

Ausser den Unfällen, die durch das gewohnte Vertuschungssystem nicht zur allgemeinen Kenntnis gelangten, sprechen doch die Unfälle bei Wannsee im Jahre 1888, bei Saint Mandé im Jahre 1891 und bei Bockenheim im Jahre 1900 allzudeutlich für die Gefährlichkeit der Oelgasbeleuchtung. Durch Bruch der Oelgasbehälter bei Zugsunfällen strömt das Oelgas aus, entzündet sich häufig und trägt viel dazu bei, das Entsetzen eines an und für sich schauerlichen Ereignisses zu erhöhen. Die Opfer dieser drei Unfälle, welche durch das sich entzündende Oelgas dem qualvollen Verbrennungstode rettungslos preisgegeben waren, sprechen eine zu deutliche Sprache.

Allerdings wurde auch dies, und zwar auf Grund sogenannter amtlicher Berichte, zu leugnen versucht, und die Ursache dem aufwirbelnden Staube, der sich an den Flammen der Lokomotive entzündete, zugeschrieben. Allein eine einfache Erwägung weist das Widersinnige einer derartigen Behauptung in überzeugender Weise nach. Der sich in den Wagen im Laufe der Zeit ansammelnde Staub

setzt sich aus einem Gemenge von organischen und anorganischen Substanzen zusammen, von welchen letztere das Uebergewicht haben. Nun soll sich dieses Gemenge, welches an und für sich kaum zur Verbrennung gebracht werden kann, da die anorganischen Teilchen unverbrennbar sind, früher entzünden, als das leichtentzündliche Oelgas, welches, mit atmosphärischer Luft oder Sauerstoff gemengt, eine gefährliche Neigung zur Selbstentzündung zeigt.

Uebrigens fand auch im italienischen Hofzuge eine durch das Oelgas verursachte Explosion statt, durch die allerdings kein grösserer Schaden verursacht und auch kein Menschenleben gefährdet wurde. Dieser Fall in einem Zuge, dem schon mit Rücksicht auf die erlauchte Person, welche denselben benützte, die höchste Sorgfalt gewidmet werden musste, zeigt wohl in der drastischsten Weise, dass es mit der vielgerühmten Gefahrlosigkeit des Oelgases doch nicht so weit her ist.

Gerade diese Explosion dürfte die Ursache gewesen sein, dass für den dazumal im Baue begriffenen Hofzug für den österreichischen Kaiser die elektrische Beleuchtung gewählt wurde.

Gerne wird hier zugegeben, dass die Zahl der durch das Fettgas hervorgerufenen Unfälle, obwohl selbe, wie schon einmal gesagt, nicht immer zur allgemeinen Kenntnis gelangen, eine verschwindend kleine ist, und man daher dieser Beleuchtung unbedingt dann das Wort reden müsste, wenn es eben keine den Zwecken besser entsprechende Beleuchtungsart geben würde.

Die Vorzüge der elektrischen Beleuchtung sind nicht bloss in der absoluten Gefahrlosigkeit derselben zu suchen, sondern auch darin, dass die Stetigkeit des Lichtes selbst durch die stärksten Erschütterungen der Wagen nicht beeinflusst wird. Diese Ruhe des Lichtes übt auf die Augen der Reisenden einen wohlthätigen Einfluss aus und ermöglichet es denselben, die Zeit durch Lesen zu kürzen.

Ein weiterer Vorzug des elektrischen Lichtes liegt in dessen Teilbarkeit und in der Möglichkeit, die Lichtquelle in der Nähe jenes Ortes anzubringen, wo der Lichtbedarf am grössten ist. Man vermag daher mit viel geringeren Lichtquantitäten einen viel besseren Effekt zu erzielen.

Die heute unvermeidliche Situierung der Lampenbrenner im Wagendome oder unmittelbar an der Wagendecke, wodurch bloss die Wagendecke hell erleuchtet wird, jener Teil aber, wo man des Lichtes bedarf, in der Regel in Halbdunkel gehüllt ist, erschwert, durch die

stets schwankenden Schatten des Beleuchtungskörpers unterstützt, ein richtiges Sehen ungemein.

Vermag man in der Mitte der Wagenabteilung, wohin das Licht nahezu senkrecht herabfällt, mit guten Sehorganen gerade noch notdürftig Gedrucktes zu entziffern, so wird dies an den Ecksitzen eines Wagenabteiles beinahe zur Unmöglichkeit.

Die Glühlampen können nun ganz unbehindert in mittlerer Höhe an den Zwischenwänden der einzelnen Wagenabteilungen so angebracht werden, dass dieselben ihr Licht in beide Wagenabteilungen ausstrahlen. Unterteilt man nun die Lampen so, dass für jeden Wagenabteil insgesamt zwei Lampen zur Verwendung gelangen, so erhält man selbst bei geringerer Lichtintensität der einzelnen Lampen eine gleichmässige Lichtverteilung, bei welcher keiner der Reisenden zu kurz kommt, und welche den wirklichen Bedürfnissen besser entspricht, als wenn nur eine Lampe von grösserer Lichtintensität an der Wagendecke befestigt ist.

Sei nach diesen wichtigen einleitenden Bemerkungen nunmehr auf die Art und Weise der elektrischen Beleuchtungsart in den Eisenbahnzügen übergegangen, so lassen sich vorerst zwei Hauptbetriebsmethoden unterscheiden, und zwar:

1. Reine Akkumulatorenbeleuchtung.
2. Gemischter Betrieb mit Lichtmaschinen und Akkumulatoren.

Bei dem reinen Akkumulatorenbetrieb sind, wenn von der als unpraktisch zu bezeichnenden Unterbringung der für den ganzen Zug ausreichenden Akkumulatorenbatterien in einem eigenen Wagen Umgang genommen wird, wieder zwei Arten der Unterbringung der Akkumulatoren zu unterscheiden, wobei der Ort der Unterbringung nicht näher bezeichnet werden soll. Es sind dies: 1. Die Unbewegliche, bei welcher die Akkumulatoren erst nach Lösung der meisten Verbindungsglieder aus dem Wagen herausgenommen und diese Verbindungen nach dem Einsetzen wieder hergestellt werden müssen, so dass die Ladung derselben durch Zuführen der Kabel von der Lademaschine im Wagen selbst erfolgt, und 2. die Bewegliche, bei welcher die Akkumulatorenbatterien, ähnlich wie die Wärmeflaschen traurigen Angedenkens, bloss aus dem Wagen herausgehoben oder in dieselben hineingeschoben werden, ohne dass eine besondere Auflösung oder Wiederherstellung der Verbindungen erforderlich würde.

Die Akkumulatorenbatterien werden hier in der Ladestation direkt geladen und beschränkt sich die Arbeit am Zuge darauf, dass die entladenen Batterien aus den Wagen herausgehoben und durch frisch-

geladene ersetzt werden. Die Verbindung mit den Leitungen wird hierbei durch Ausnützung des Akkumulatorengewichtes selbstthätig besorgt und sind die Batteriekästen dementsprechend mit korrespondierenden Schleif- und Druckkontakten ausgerüstet.

Dass die zweite Methode der beweglichen Unterbringung der Sammlerbatterien für die Zwecke des allgemeinen Zugsverkehres unleugbare Vorzüge besitzt, ist wohl schwer zu bestreiten, da durch dieselbe eine gewisse Unabhängigkeit von der Laufdauer der Züge erreicht wird. Durch Aufstellen von geladenen Sammlerbatterien in den vorher zu bestimmenden Stationen ist es eben stets möglich, für die entladenen einen Ersatz zu schaffen und daher den betreffenden Wagen nach Belieben weiter zu dirigieren.

Dieser Vorteil ist aber auch von Nachteilen begleitet. Das Aus- und Einladen dieser Batterien bedingt eine Reihe von Vorkehrungen und Vorrichtungen, die bei der stabilen Unterbringung dieser Batterien nicht notwendig sind. Ferner leiden diese Batterien durch die beim raschen Aus- und Einladen unvermeidlichen Erschütterungen vielfach Schaden, indem die aktive Masse leichter aus den Bleigittern herausfällt und sonach die Elektroden vorzeitig zu Grunde gehen.

Es ist demnach der beweglichen Unterbringung dieser Batterien nur dann der Vorzug zu geben, wenn die Erhaltung der Freizügigkeit der Wagen dies verlangt.

Bei Turnuszügen und Turnuswagen aber, die eine schon im vornehinein ganz genau bestimmte Laufdauer haben, in regelmässigen Zwischenräumen in die Ladestation zurückkehren und dortselbst hinreichend langen Aufenthalt nehmen, dass die Nachladung der Batterien während desselben erfolgen kann, dürfte sich aus den vornehin erwähnten Gründen die stabile Unterbringung der Batterien besser bewähren.

Inwiefern die in neuerer Zeit vielfach verwendeten Schnellaufladeakkumulatoren für die Zwecke der elektrischen Zugsbeleuchtung herangezogen werden können, liesse sich erst auf Grund eingehender Versuche bestimmen. Soferne sich dieselben praktisch bewähren, und hieran ist kaum zu zweifeln, wird, da die Aufladung derselben sehr rasch erfolgt, der stabilen Unterbringung derselben der Vorzug zu geben sein.

Für den gemischten Betrieb sind, ohne auf die vielen möglichen Zwischenkombinationen einzugehen, folgende Betriebsmethoden denkbar:

1. Die Lichtmaschine, welche das Laden der Akkumulatoren mitbesorgt, wird von einer der Wagenachsen des Zuges angetrieben.

2. Der Antrieb der Lichtmaschine bezw. stromerzeugenden Dynamo, erfolgt durch eine eigene Dampfmaschine, welche den zum Betriebe erforderlichen Dampf von der Lokomotive geliefert erhält.

3. Wie vor, doch ist für den Betrieb der Dampfmaschine auch ein eigener Dampferzeuger vorgesehen, so dass eine vollständige Ladestation mitgeführt und eine völlige Unabhängigkeit von der Lokomotive oder der Zugsbewegung erreicht wird.

An Stelle der Dampfmaschine und des Dampfkessels könnte nun als Antriebsmaschine ein Benzin- oder Petroleummotor verwendet werden, wodurch auch das Erfordernis an Raum wesentlich geringer wird. Allein die Feuergefährlichkeit dieser beiden Produkte, durch welche sich allerdings noch ein bedeutend günstigerer Nutzeffekt erzielen liesse, lassen die Anwendung derselben nicht als rätlich erscheinen.

Alle diese drei Betriebsarten bedingen, wenn nicht, wie dies thatsächlich schon ausgeführt wurde, jeder Wagen mit einer Lichtmaschine ausgerüstet wird, eine lösbare elektrische Verbindung der Wagen untereinander, eine sogenannte elektrische Kuppelung. Die Lichtmaschine muss nämlich einen Zug von der stärksten zulässigen Zusammensetzung mit der erforderlichen Elektrizitätsmenge zu versorgen im stande sein. Da aber die Zugszusammenstellung stets wechselt, Wagen vom Zuge während des Aufenthaltes in den Stationen ab- oder in denselben eingestellt werden müssen, ist eine derartige Kuppelung nicht zu entbehren.

Die teilweise bereits berührten Schattenseiten dieser elektrischen Kuppelungen vermögen oft die ganze Beleuchtung in Frage zu stellen. Die durch Kuppelungen herzustellenden Leitungsverbindungen zwischen den einzelnen Wagen für die elektrischen Interkommunikationssignale zeigen nach den langjährigen Erfahrungen, dass eine sichere Leitungsverbindung für die Dauer nur schwer aufrecht zu erhalten ist. Es steht somit auch hier, trotz bedeutend kräftigerer Ausführung der Verbindungstheile, zu befürchten, dass eine allmähliche Lockerung derselben eintreten wird, welche, wenn nicht durch die eifrigste Wartung und den sofortigen Ersatz aller im geringsten schadhaften Teile vorgebeugt wird, Störungen hervorrufen muss.

Eine derartige sorgsame, mit grossen Kosten verbundene Instandhaltung lässt sich jedoch bei allgemeiner Einführung der elektrischen Beleuchtung kaum durchführen.

Es ist hierbei durchaus nicht nötig, dass die Leitungsverbindung unterbrochen wird, da schon eine Vergrösserung des Leitungswider-

standes durch unvollkommenen Kontakt, Störungen oder zum mindesten schlechtes Brennen der Lampen hervorruft, weil bei dem an und für sich geringen Widerstande des äusseren Stromkreises das Hinzuschalten eines neuen Widerstandes den Strom schon empfindlich schwächt.

Aber selbst für den Fall, als die Lampen allein von den in den einzelnen Wagen untergebrachten Akkumulatoren gespeist werden, und der von der Lichtmaschine durch die durchgehende Leitung entsendete elektrische Strom ausschliesslich zum Laden der Akkumulatoren ausgenützt wird, macht sich eine Vergrösserung des Leitungswiderstandes durch vermehrten Kraft- bezw. Dampfverbrauch empfindlich bemerkbar.

Sind ausserdem in einen elektrisch erleuchteten Zug Wagen, welche für die elektrische Beleuchtung nicht eingerichtet sind, einzustellen, so erhöht sich die Schwierigkeit noch dadurch, dass Ueberwurfkabel zur Herstellung der leitenden Verbindungen über den zwischengestellten Wagen zu Hilfe genommen werden müssen, deren Herbeischaffung und Anbringung stets zeitraubend ist.

Versagt nun diese Art der Leitungsverbindung gänzlich, so müssen die rückwärts der Fehlerstelle befindlichen Wagen durch die Akkumulatorenbatterien allein erleuchtet werden, und ist die Möglichkeit nicht ausgeschlossen, dass sich dieselben vorzeitig erschöpfen, weil ja deren Kapazität aus ökonomischen Gründen nur sehr gering gewählt wird.

Demgemäss dürfte sich die Anwendung des gemischten Betriebes, einerlei welcher Betriebsmethode, mit jedoch nur einer Generatormaschine für den ganzen Zug, nur für solche Züge als vorteilhaft empfehlen, welche während ihrer ganzen Laufdauer die gleiche Zusammensetzung behalten, und deren Rangierung in der Ausgangsstation eine sehr sorgfältige Ueberwachung zu teil werden kann. Das Gleiche gilt natürlich auch für die reine Akkumulatorenbeleuchtung in jenen Fällen, wo die für den gesamten Zug ausreichenden Akkumulatoren in nur einem Wagen untergebracht werden.

Für gewisse Züge, namentlich solche, deren Laufrichtung und Laufdauer eine im vornehinein unbestimmbare ist, für welche somit eine Auswechselung der erschöpften Akkumulatoren gegen frischgeladene überhaupt nur sehr schwer vorgesehen werden kann, wird der gemischte Betrieb, soll die Beleuchtung immer aufrecht erhalten werden, überhaupt nicht zu vermeiden sein.

Welche Methode des Betriebes die praktisch geeignetste ist, lässt sich überhaupt nicht im vornehinein feststellen, da nur eine ein-

gehende Erwägung aller in Betracht kommenden Verhältnisse zu einem positiven Schlusse führen kann.

Die reine Akkumulatorenbeleuchtung, und zwar mit auswechselbaren Akkumulatorenbatterien, wird sich auf Bahnen von beschränkter Ausdehnung und mit dichtem Verkehre wohl überall leicht einbürgern lassen, wenn man für den Durchzugsverkehr besondere Vorkehrungen trifft. Liegt die Ladestation zufällig auch in der Ausgangsstation, so bietet auch die elektrische Beleuchtung von Zügen konstanter Zusammensetzung mit stabil untergebrachten Akkumulatoren keine Schwierigkeit.

Die meiste Unabhängigkeit gewährt jedoch der gemischte Betrieb mit direktem Antriebe der Dynamo durch Uebertragung der Radachsbewegung für jenen Fall, wo jeder Wagen mit einer solchen Einrichtung ausgerüstet ist, also die Einzelwagenbeleuchtung, weil hierbei die umständliche und zeitraubende elektrische Kuppelung und deren Nachteile entfallen und die Freizügigkeit der Wagen im vollsten Masse gewahrt bleibt.

Die Einrichtungen für den gemischten Betrieb sind jedoch, wie später hervorgehoben wird, sehr komplizierter Natur und kann selbst unter regelmässigen Verhältnissen ein stets exaktes Arbeiten aller Teile derselben nur dann erwartet werden, wenn deren Erhaltung die grösste Sorgfalt gewidmet wird. Dadurch, dass nun jeder Wagen mit solchen Einrichtungen ausgerüstet wird, multipliziert sich die Anzahl der zu erhaltenden Apparate, und wird es daher nur bei sehr guter Organisation und strenger Ueberwachung möglich werden, auch eine tadellose Beleuchtung für die Dauer aufrecht zu erhalten.

Doch auch diese Schwierigkeit lässt sich bei einigem guten Willen, wenn nur mit hinreichendem Ernste und genügender Ausdauer an das Werk gegangen wird, überwinden.

Wenn nun auch bei dem gemischten Betriebe die Akkumulatoren nicht entbehrt werden können, indem sie zur Zeit des Stillstandes der Züge und während des Anfahrens und Bremsens derselben den Strom zur Beleuchtung zu liefern haben, so spielen dieselben hier nicht jene wichtige Rolle, wie bei der reinen Akkumulatorenbeleuchtung.

Die Kapazität der Akkumulatoren kommt hier, da selbe während der Fahrt stets nachgeladen werden, weniger in Betracht und muss selbe nur ausreichend sein, um bei allfälligem Eintreten eines Gebrechens in der Maschinen- oder Apparatenanlage die Beleuchtung bis zum Beheben desselben, also durch höchstens 3 bis 4 Stunden, versorgen zu können.

Anders liegt die Sache jedoch bei der reinen Akkumulatorenbeleuchtung, indem die Kapazität der Batterie ausreichen muss, die Beleuchtung während der ganzen Fahrtdauer eines in normaler Tour verkehrenden Wagens zu versorgen. Hier ist und bleibt die Konstruktion des Akkumulators die Hauptsache, da bei möglichst geringem Akkumulatorengewicht die höchste erreichbare Kapazität anzustreben ist. Nun lassen sich grosse Haltdauer und grosse Kapazität schwer vereinigen, und man wird daher sich zur Wahl einer Akkumulatorentype entschliessen müssen, welche nach beiden Richtungen hin die günstigsten Ergebnisse erwarten lässt.

Während daher bei der gemischten Betriebsweise vorerst die Frage der Maschinen und Hilfsapparate in das Auge gefasst werden muss, spitzt sich selbe bei der reinen Akkumulatorenbeleuchtung zu einer Akkumulatorenfrage zu.

Um diesen Gegenstand etwas näher zu beleuchten, muss die Wirkungsweise und das Verhalten der Akkumulatoren im Betriebe einer eingehenderen Betrachtung unterzogen werden.

Da hier nur die reinen Bleiakkumulatoren ins Auge zu fassen sind, weil nur diese sich bisher in praktischem Betriebe bewährt haben, sei hier nur den Eigenschaften derselben eine kurze Schilderung gewidmet. Für die Beurteilung der charakteristischen Eigenschaften derselben, als da sind Dauerhaftigkeit, Oekonomie, Kapazität, Stärke der Ladung und der Entladung geben die chemischen Vorgänge, welche sich sowohl bei der Ladung als auch der Entladung im Inneren der Zellen abspielen, wertvolle Anhaltspunkte.

Die Ladung der Bleiakkumulatoren beruht nur auf Formierung von fein verteiltem schwammigen Blei auf den negativen und von Bleihyperoxyd auf den positiven Platten und bleibt es für den Endvorgang ganz gleichgiltig, ob, wie bei den Elementen nach der Planté-Type, reine Bleiplatten verwendet oder wie bei den Elementen nach der Faure-Type und deren Abarten, zur Beschleunigung der Formierung, Pasten aus Bleioxyden auf die Bleiplatten oder Gerippe aufgetragen werden.

Der Schwefelsäure, welche, in verdünntem Zustande angewendet, die leitende Verbindung zwischen den positiven und negativen Platten im Inneren der Zellen herstellt, fällt nicht nur als Leiter, sondern auch als Reagens bei den sich abspielenden Zwischenprozessen eine wichtige Rolle zu, indem selbe stets das Bestreben hat, mit dem metallischen Blei oder dem Bleihyperoxyd eine Bleisalzverbindung zu bilden.

Bei der Entladung bildet sich demnach sowohl auf den positiven als auch negativen Platten als Endergebnis des chemischen Prozesses weisses schwefelsaures Bleioxyd (Bleisulfat) und zwar in folgender Weise:

$$PbO_2 + H_2SO_4 = PbSO_4 + H_2O + O$$

für die positive und

$$Pb + O + H_2SO_4 = PbSO_4 + H_2O$$

für die negative Platte, welch letztere sohin den freiwerdenden Sauerstoff der positiven Platte absorbiert.

Dieser Prozess lässt sich wie folgt noch einfacher darstellen:

$$PbO_2 + Pb + 2H_2SO_4 = 2PbSO_4 + 2H_2O.$$

Hiemit ist nur das Endresultat für die Entladung als allein massgebend in Betracht gezogen worden, während auf die vielfach komplizierteren Zwischenprozesse nicht eingegangen wurde. Die Grenze der normalen Entladung wäre sohin durch die Masse des während der Ladung gebildeten Bleihyperoxydes und Bleischwammes gegeben. Sobald alles Bleihyperoxyd reduziert bezw. aller Bleischwamm oxydiert ist, muss der Entladungsprozess aufhören und die Zelle kann keinen Strom mehr abgeben.

Thatsächlich lassen sich aber diese Arten der Sekundärelemente in der Regel nicht kontinuierlich entladen, scheinen sich vielmehr zu erschöpfen, um späterhin, anscheinend erholt, wieder Strom abzugeben. Die Ursache dieser Erscheinungen ist auf mehr oder minder rein physikalische Vorgänge zurückzuführen und liegt hauptsächlich darin begründet, dass das Endprodukt der Entladung, das schwefelsaure Bleioxyd oder Bleisulfat, ein Nichtleiter ist.

Verfolgt man den Vorgang bei der Endladung etwas eingehender, so zeigt sich, dass sich den als Leitern zu bezeichnenden aktiven Materialen, dem Bleihyperoxyd und dem Bleischwamm, eine mit der fortlaufenden Entladung stets wachsende Menge von Bleisulfat untermischt und dadurch deren Leitungsfähigkeit herabmindert.

Es kann dies so weit gehen, dass trotzdem noch hinreichend aktive Masse in Vorrat ist, die weitere Stromentwickelung aufhört, weil die Leitungsfähigkeit des mit Bleisulfat gemischten Bleies, bezw. Bleihyperoxydes auf ein Minimum herabgesunken ist.

Die Bildung von Bleisulfat wird vorerst an den äussersten Teilen der mit den aktiven Massen versehenen Platten vor sich gehen und

die Leitungsfähigkeit derselben der fortschreitenden Entladung entsprechend nach und nach verringern.

Der Abfall der Klemmenspannung an den Akkumulatoren von den anfänglichen 2.4 auf 1.8 Volt und darunter bei der Entladung, erklärt sich hieraus in einfacher Weise, und lässt sich auch erkennen, dass bei schlecht konstruierten Platten oder bei zu rascher Entladung ein plötzliches Versagen der Elemente lange bevor eintreten kann, ehe der Vorrat an aktivem Materiale erschöpft ist.

Es bildet sich nämlich an den äusseren Flächen der Elektroden eine Fläche von nichtleitendem Bleisulfat, welche namentlich bei rascher Entladung so dicht zu werden vermag, dass die die Reaktion vermittelnde Schwefelsäure nicht mehr zur aktiven Masse durchzudringen, somit auf selbe nicht mehr einzuwirken vermag.

Erst nach längerer Zeit der Ruhe, während welcher die Schwefelsäure allmählich zur aktiven Masse zutritt, kann eine weitere Entladung stattfinden, welche aber infolge des gehemmten Durchzuges der Schwefelsäure und der Neubildung von Bleisulfat unbedingt schwächer werden muss.

Eine so dichte Lagerung des Bleisulfates auf den aktiven Massen der beiderseitigen Elektrodenplatten vermag aber auch die Regenerierung bezw. Neuformierung des Akkumulators in Frage zu stellen. Ist der Belag sehr dicht und stark, so kann er als vollständiger Nichtleiter angesehen werden und der behufs Ladung durch den Akkumulator gesendete elektrische Strom sucht den Weg über das Bleigerippe und wirkt auf das Bleisulfat nicht mehr ein.

In günstigeren Fällen ist die Neuformierung des Akkumulators mit bedeutenden Energieverlusten verbunden, weil ein Teil der elektrischen Arbeit sich bei Ueberwindung des grossen Leitungswiderstandes in Wärme umsetzt, also für die angestrebte chemische Arbeit verloren geht.

Die beim Entladen der Akkumulatoren stufenweise fallende Leitungsfähigkeit des aktiven Materials erklärt auch, dass die Elektrizitätsmenge, welche aus einer gegebenen Menge von Bleischwamm und Bleihyperoxyd theoretisch berechnet wird, praktisch niemals ganz zu gewinnen ist, weil eben eine ganz ansehnliche Menge dieser aktiven Masse als Leiter dienen muss.

Ein weiterer, sowohl bei der Ladung als auch bei der Entladung in Berücksichtigung zu ziehender Umstand ist, dass sich die aktive Masse in fortwährender Bewegung befindet und während der Ladung durch Abgabe von Schwefelsäure an Volumen abnimmt, welches sich

bei der Entladung durch Aufnahme von Schwefelsäure wieder vergrössert.

Wird diese Volumsveränderung durch zu schnelles Laden oder zu starkes Entladen eine zu rasche, so treten Deformationen in der aktiven Masse auf, welche ein Losbröckeln und Abfallen derselben von den Gerippen, ja selbst eine Verziehung der Gerippe herbeizuführen vermögen. Aber auch unter normalen Verhältnissen wird durch das fortwährende Laden und Entladen eine Lockerung des Gefüges der aktiven Masse herbeigeführt, wodurch sich dieselbe nach und nach ablöst und zu Boden fällt.

Aus allen diesen hier nur kurz angedeuteten Erscheinungen lassen sich auch bestimmte Anhaltspunkte für die Konstruktion der Akkumulatoren, je nach den Zwecken, welchen selbe zu dienen haben, sowie für deren Behandlungsweise gewinnen.

Da die Akkumulatoren für die elektrische Beleuchtung der Wagen mit nahezu konstanter Stromstärke entladen werden, sind dieselben in dieser Beziehung keinen abnormalen Anforderungen ausgesetzt. Hingegen muss von selben möglichst grosse Kapazität bei geringem Gewichte und möglichst grosse Haltbarkeit verlangt werden, zwei Dinge, die in direktem Gegensatze zu einander stehen.

Um eine grosse Kapazität zu erhalten, ist die Menge der wirksamen Masse zu vermehren, dieselbe darf aber, weil ja die Schwefelsäure sonst keinen Zutritt zu dem Inneren derselben findet, nicht zu dick in der Schichte und nicht zu kompakt gehalten sein. Hiedurch wird nun die Haltbarkeit wieder ungünstig beeinflusst, weil die aktive Masse bei lockerem Gefüge durch die fortwährende Ausdehnung und Zusammenziehung leichter zur Loslösung gelangt. Da jedoch hier diese Ausdehnung bezw. Zusammenziehung der aktiven Masse mit Rücksicht auf die lange Ladedauer und langsame Entladung nur langsam vor sich geht, ist der Einfluss dieser Volumsveränderung auf die Lebensdauer der Akkumulatoren weniger von Bedeutung. Hingegen ist zu berücksichtigen, dass die Sammlerbatterien durch die Bewegung des Zuges fortwährenden Erschütterungen ausgesetzt sind. Diese Erschütterungen sind nun geeignet, im Laufe der Zeit eine Lockerung des Gefüges der aktiven Masse herbeizuführen, sie gewähren aber wieder den Vorteil, dass das flüssige Elektrolyt, welches hiedurch gleichfalls in fortwährender Bewegung sich befindet, leichter in das Innere der aktiven Masse eindringt.

Dieser letztere Umstand trägt nun dazu bei, die Konstruktion geeigneter Batterien zu erleichtern, indem die aktive Masse kompakter

gehalten werden darf, als bei Batterien, von welchen grosse Kapazität und geringes Gewicht verlangt wird, die sich aber hiebei fortwährend in dem Zustande der Ruhe befinden.

Da jedoch bei diesen Akkumulatorenbatterien die Gewichtsfrage nicht jene bedeutende Rolle spielt, wie bei den elektrischen Automobils, indem das ermittelte Gewicht dieser Einrichtungen im Durchschnitte 1050 kg beträgt, ist man in der Lage, mit relativ bedeutenden Batteriegewichten rechnen zu können, wodurch auch der Verwendung der als äusserst widerstandsfähig bekannten Oberflächenakkumulatoren der Weg geöffnet ist. Diese Akkumulatoren sind nach dem Planté-Prinzip in der von Tudor angegebenen Weise gebaut und erscheint bei denselben die Oberfläche durch künstliche Behandlung der Platten in einer Weise vergrössert, dass eben allen Anforderungen für ein günstiges Wirken der Akkumulatoren nach den vorstehend gegebenen Erläuterungen entsprochen ist. Die Oberfläche einer derartigen positiven Platte (für die weniger in Anspruch genommenen negativen Platten ist die Faure-Type, mit Paste ausgefüllte Bleirahmen, beibehalten) ist ungefähr 8mal so gross als die massiver Bleiplatten von gleicher Grösse und gleichem Gewichte. Die aktive Masse, welche durch das Formieren gewonnen wird, verteilt sich sonach auf eine sehr grosse Fläche in dünner Schicht und sind hiedurch alle jene Faktoren, welche das Wirken der Akkumulatoren ungünstig beeinflussen, ausgeschieden.

Als Hauptvorteil dieser Akkumulatoren ist deren durch den massiven Bleikörper bedingte Widerstandsfähigkeit gegen äussere Einflüsse, sowie die Möglichkeit, dieselben durch Anwendung einer erhöhten Spannung, 2,5 bis 2,7 Volts pro Zelle, rasch aufladen zu können.

Das Ausfallen der aktiven Masse, welche zur rascheren Formierung der Platten zwischen die Lamellen der Platte eingestrichen wird, kommt hier nicht in Betracht, da sich durch die fortwährende Neuformierung, bei Ladung stets hinreichend aktive Masse bildet, um den hiedurch entstehenden Verlust zu ersetzen. Es zeigt sich im Gegenteile, dass die Kapazität derartiger Batterien im Dauerbetriebe stetig zunimmt. Allerdings wird durch die stete Neubildung aktiver Masse, welche doch nur aus dem Bleie des Gerippes gewonnen werden kann, das Gerippe geschwächt und tritt endlich jener Zeitpunkt ein, wo selbes nicht mehr hinreichend widerstandsfähig ist und durch ein Neues ersetzt werden muss.

Nach im Trambahnbetriebe gewonnenen Erfahrungen, vermag jedoch eine solche Platte bis zu 10000 Ladungen und Entladungen

zu überdauern, ehe selbe so weit zerstört ist, um nicht mehr mit voller Sicherheit in der Zelle belassen werden zu können.

Die Anforderungen, die im Trambahnbetriebe an derartige Akkumulatoren gestellt werden, sind aber ausser allem Zweifel bedeutend grössere, als bei dem reinen Beleuchtungsbetriebe, indem bei letzterem die Stromabnahme eine nahezu konstante ist und die Batterien mit geringer Stromstärke entladen werden. Es ist also auch die Annahme berechtigt, dass sich die Batterien für die elektrische Zugsbeleuchtung viel länger erhalten müssen.

Aber schon aus vorstehend angeführter beglaubigter Ziffer lässt sich entnehmen, dass die Batterien bei nur einigermassen sorgfältiger Wartung sich jahrelang tadellos erhalten lassen müssen.

Nach diesen Einleitungen soll nun auf die praktische Ausführung des Beleuchtungsbetriebes der Eisenbahnwagen übergegangen werden.

Vor allem sei die Trennung nach der Betriebsmethode durchgeführt und sollen daher vorerst die Einrichtungen für den reinen Akkumulatorenbetrieb behandelt werden.

Bei dem reinen Akkumulatorenbetrieb sind zwei verschiedene Arten der Unterbringung der Batterien zu unterscheiden und zwar die stabile und die mobile.

Bei dem stabilen Einbau der Batterien in die Wagen muss die Ladung derselben im Wagen selbst erfolgen, zu welchem Zwecke der Wagen auf ein in der Nähe der Ladestation befindliches Geleise gebracht werden muss. Von der Ladestation ausgehende Kabel führen in die Nähe der Geleise und werden von dort aus flexibel ausgestaltet, zu den Akkumulatorenkästen geführt und mittelst Steckkontakten mit denselben leitend verbunden. Die Manipulation hiebei ist eine relativ einfache, so dass die gesamte Verbindungs- und Ueberwachungsarbeit von jedem Manipulanten ohne Gefahr ausgeführt werden kann.

Als Vorteile dieser Art der Unterbringung der Batterien, sind zu bezeichnen: a) Ersparnis an Batterien, deren Zahl sich theoretisch genommen gegenüber der mobilen Unterbringung auf die Hälfte reduzieren lässt. b) Längere Erhaltung derselben, da dieselben nicht den Erschütterungen und der rohen Behandlung ausgesetzt sind, wie diejenigen Batterien, die nach ihrer Erschöpfung in die Ladestation gebracht und dortselbst aufgeladen werden müssen, um dann geladen wieder an den Wagen zurückbefördert zu werden. c) Leichtere Manipulation und d) als Endergebnis der Vorteile ad a, b und c geringere Betriebskosten.

Als Nachteile dieser Art und Weise der Batterieversorgung sind anzuführen: a) Abhängigkeit von einer bestimmten Ladestation, wodurch die Freizügigkeit der Wagen eingeschränkt wird. b) Längere Ruhepause der Wagen in den Ladestationen, damit die Batterien während derselben aufgeladen werden können. c) Schlechtere Ausnützung der Ladestation, indem sich die Ladung auf die durch den Zugsverkehr gegebenen Zwischenpausen beschränkt, und sich sohin ein ungleichmässiger Betrieb ergibt, der wieder auf die Erzeugungskosten der Elektrizität nachteilig rückwirkt. (Dieser Nachteil lässt sich wohl dadurch beseitigen, dass eine grössere Akkumulatorenbatterie in der Ladestation aufgestellt und diese wieder zum Laden der Wagenbatterien ausgenutzt wird. In einem solchen Falle arbeitet die Maschinenanlage ununterbrochen und gleichmässig und kann auch die Kapazität der Zentrale geringer bemessen werden, da die in der Akkumulatorenbatterie aufgespeicherte Energie für die eigentliche Ladearbeit mit herangezogen wird. Der Vorteil der hiedurch erreichbareu Verminderung der Maschinenanlagekosten dürfte ebenso wie der Vorteil des ununterbrochenen Betriebes, jedoch durch die Anschaffungskosten der Batterie, deren Erhaltung, sowie der durch dieses Zwischenglied entstehenden Arbeitsverluste, wieder wettgemacht werden.) Endlich d) als Folge von b) schlechtere Ausnützung des Wagenparkes.

Durch die Anwendung von Oberflächen- oder Schnellauflade-Akkumulatoren, lässt sich nun die Ladezeit wesentlich einschränken, indem die Aufladung einer Batterie, welche 14 Lampen à 10 NK durch 36 Stunden zu speisen hat, in $1\frac{1}{2}$ Stunden vollzogen werden kann.

Die mobile Unterbringung der Batterien in den Wagen hat den Nachteil, dass die Batterie nach jeder Entladung aus dem Wagen heraus genommen und in die Ladestation gebracht werden muss. Es bedingt dies, da die erschöpfte Batterie sofort durch eine frisch geladene ersetzt werden muss, für jeden Wagen einen doppelten Batteriesatz und dadurch, da ja die Batterien den wertvollsten Teil der Einrichtung bilden, eine Erhöhung der Anlage- und Betriebskosten. Ausserdem werden die Batterien durch das Ein- und Ausladen heftigen Erschütterungen ausgesetzt, die die Haltdauer derselben nachteilig beeinflussen. Dieser letztere Nachteil lässt sich jedoch durch geeignete Einrichtung der Verladevorrichtungen und durch entsprechende Ueberwachung des Personales auf ein solch geringes Mass herabdrücken, dass dieser Nachteil wohl kaum in Betracht gezogen werden kann.

Hingegen ist bei der mobilen Unterbringung der Batterien der Vorteil der Freizügigkeit der Wagen gewahrt, indem in gewissen Depotstationen aufgeladene Batterien in Reserve gehalten werden können, von welchen aus der Umtausch der entladenen Batterien besorgt wird, ohne dass es notwendig erscheint, in der Depotstation auch gleichzeitig eine Ladestelle zu besitzen.

Anderenteiles wird wieder in den Ladestationen ein weit geringerer Aufenthalt der Wagen bedingt, da sich die Erneuerung der Batterien bei entsprechenden Vorkehrungen in sehr kurzer Zeit vollziehen lässt und hiefür eine Ruhepause von einer Viertelstunde vollkommen ausreichen muss.

Dieser Vorteil ist namentlich beim Lokalverkehre nicht zu unterschätzen, da hier auf eine möglichst intensive Ausnützung des Wagenparkes Bedacht zu nehmen ist.

Ein gegenseitiges Erwägen der Vor- und Nachteile dieser beiden Methoden lässt keine Entscheidung darüber zu, welcher derselben der Vorzug zu geben sei. Es lassen sich jedoch, und dies dürfte der richtige Zwischenweg sein, beide Methoden in der Weise kombinieren, dass die Batterien mobil untergebracht, dagegen je nach den gegebenen Verhältnissen im Wagen selbst aufgeladen oder bloss ausgewechselt werden. Eine Aenderung der Einrichtung wird hiedurch nicht notwendig, da ja die Oeffnungen zum Einstecken der Ladestöpsel in den Batteriekästen für den einen oder den anderen Fall ohnedies vorgesehen werden müssen und die Verbindung der Speiseleitungen der Wagen automatisch durch das Gewicht der Batterien, welches einen guten Kontakt sichert, also genau wie bei der mobilen Unterbringung der Batterien hergestellt werden kann. Der einzige Unterschied, der sich nach der hier bestem Wissen nach zuerst vorgeschlagenen Methode ergibt, bezieht sich auf die Manipulation, die entsprechend den gegebenen Verhältnissen zu organisieren sein wird.

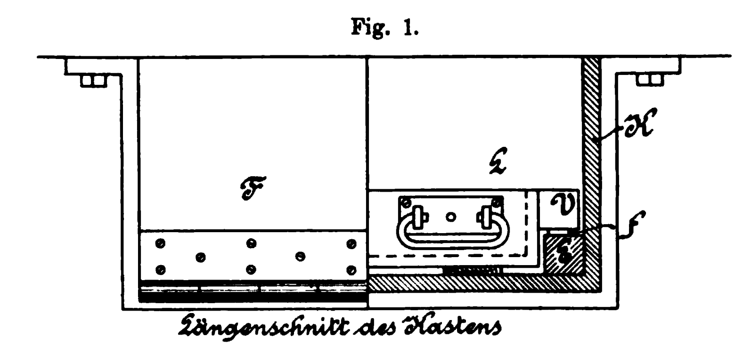
Die Art und Weise der Unterbringung der Wagenbatterien im Wagen ist eine sehr einfache. In der Regel wird an der Mitte und Unterseite der Wagen ein Behälter angebracht, in welchen die Batterien hineingeschoben und von welchen die Drähte zu den Lampen durch den Wagenboden hindurchgeführt werden. Dieser Wagenkasten ist verschliessbar eingerichtet und wird der Schlüssel zu demselben nur dem an der Manipulation beteiligten Personale zugänglich gemacht.

Die Akkumulatoren, in kleinere Batteriesätze unterteilt unter den Sitzplätzen unterzubringen, wie dies schon vielfach durchgeführt wurde, ist entschieden als unzulässig zu bezeichnen. Die Ausdünstung

und unvermeidliche Gasentwickelung der Akkumulatoren verpestet die inneren Räume der Waggons und vermag bei ungenügender Ventilation den Aufenthalt in selben nicht nur ungemütlich, sondern auch ungesund zu gestalten.

Anderenteils wird durch diese Art und Weise der Versorgung der Batterien, das Sicherheitsmoment indirekt beeinflusst. Die Gefahr

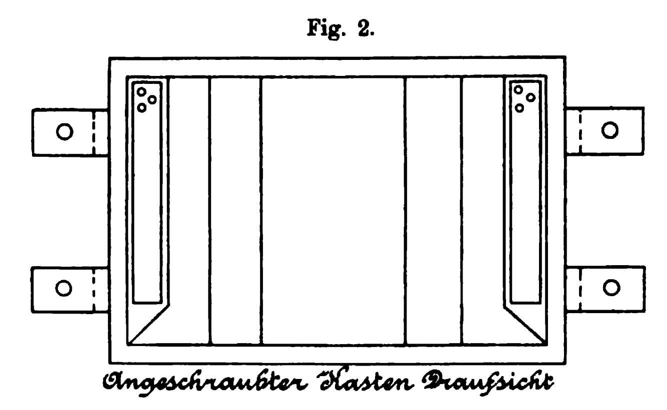
Fig. 1.



Längenschnitt des Kastens

von Eisenbahnkatastrophen ist, wenn auch durch die getroffenen Massnahmen auf ein Minimum herabgedrückt, doch nicht ganz ausgeschlossen. Tritt nun ein derartiges Ereignis ein, welches eine gänzliche oder teilweise Zerstörung der Wagen herbeiführt, so ist es wahr-

Fig. 2.



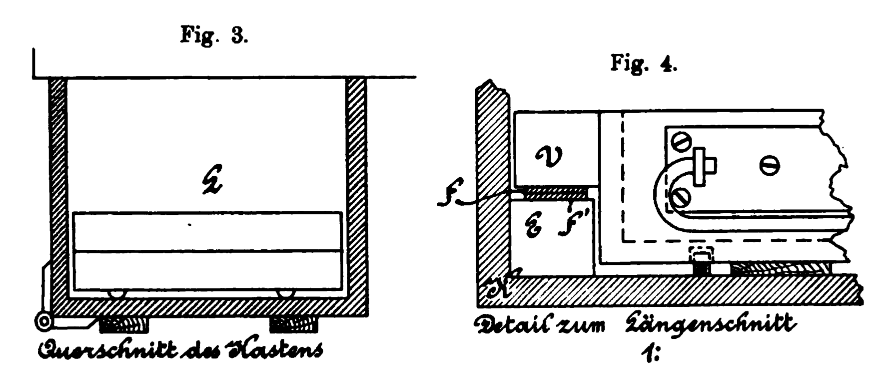
Angeschraubter Kasten Draufsicht

scheinlich, dass die Schwefelsäure aus den Akkumulatorengefässen ausfliesst und hiebei möglicherweise die in dem Wagen befindlichen Personen durch Hervorrufung von intensiven Brandwunden ernstlich schädigt. Diese Art der Unterbringung der Batterien sollte daher überhaupt nicht gestattet und nur in den seltensten Fällen bei Bahnen niederster Ordnung ausnahmsweise für zulässig erklärt werden.

Die Art und Weise der Unterbringung der Akkumulatorenbatterien, wie solche bei der Jura-Simplonbahn in Anwendung war und sich bestens bewährt hat, ist aus den Fig. 1—5 zu entnehmen. Die Akkumulatoren, aus neun in drei Abteilungen nebeneinander gestellten Zellen bestehend, sind hier in einer Art Lade L unter-

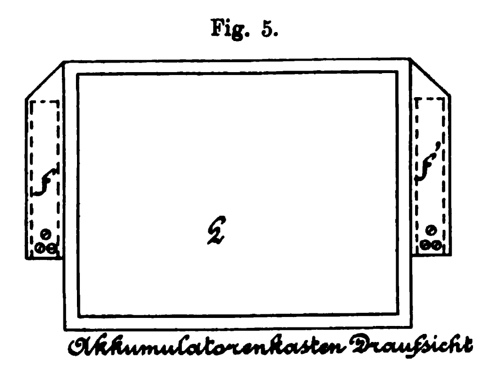
Fig. 3.

Fig. 4.



gebracht, welche mit zwei seitlichen Vorsprüngen v—v versehen ist. An der Unterseite dieser Vorsprünge sind zwei kräftige Kupferfedern f f_1 befestigt, deren eine mit dem positiven, die andere mit dem negativen Pole der Akkumulatorenbatterie in gut leitender Verbindung steht. In dem an der Unterseite des Wagens mit starken Eisenbändern

Fig. 5.



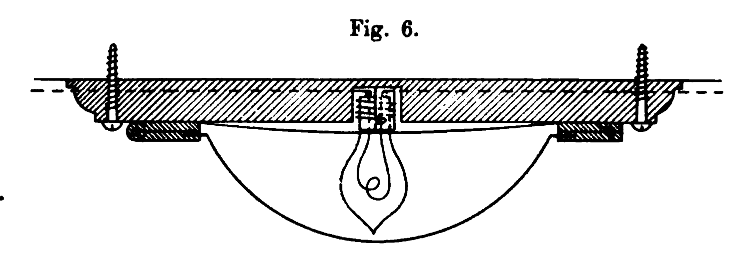
befestigten Kasten K zur Aufnahme dieser Lade sind rechts und links zwei Einschubleisten EE vorgesehen, welche an ihrer Oberseite gleichfalls zwei starke Kupferfedern $f^1 f^1$ tragen, die wieder mit den beiden Leitungen, welche zu den Lampen führen, verbunden sind. Durch einfaches Einschieben der Lade in den Kasten treten die korrespondierenden Kupferfedern in Kontakt, und die Leitungsverbindung ist hergestellt.

Da das Gewicht der Akkumulatorenbatterien ein ziemlich bedeutendes ist und die Kupferfedern beim Einschieben der Lade in den Kasten sich stets blank scheuern, ist durch diese Art der Verbindungsherstellung zwischen Batterie und Leitungen ein stets guter Kontakt gesichert.

Zum leichteren Einbringen der Lade in den Kasten ist selbe an der Unterseite mit Rollen versehen und trägt an der Vorderseite zwei solide Handgriffe. Der Kasten selbst ist durch eine massive Klappthüre F verschliessbar.

Eine bestimmte Norm für die Unterbringung der Akkumulatoren in eigenen unterhalb des Wagens befindlichen Kästen lässt sich wohl schwer feststellen, da dieselbe von der Wagentype, der Laufdauer, der erforderten Brenndauer der Lampen, der Intensität der Beleuchtung etc. abhängt und wurde die vorstehend beschriebene Anordnung nur als typisches Beispiel gewählt.

Fig. 6.

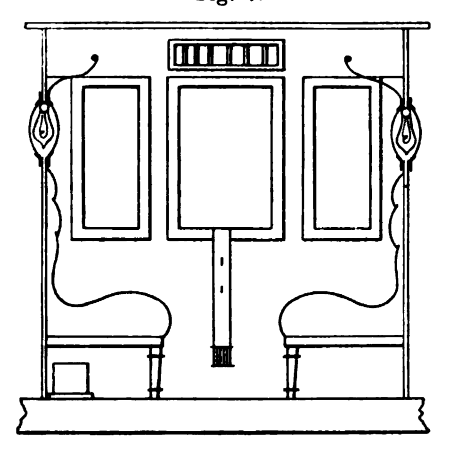


Die Anordnung der Lampen und die Leitungsverbindung ist bei Verwendung von Akkumulatoren die denkbar einfachste. Bei Umgestaltung von Wagen, welche bisher für Oelgasbeleuchtung eingerichtet waren, auf elektrische Beleuchtung, wird man die Lampen schon aus Ersparungsrücksichten wie bisher im Lampendome unterbringen. Bei neu einzurichtenden Wagen werden dieselben entweder, wie dies aus Fig. 6 erhellt, an der Wagendecke befestigt und mit einem Reflektor versehen, oder, wie dies Fig. 7 und 8 zeigen, so in die Zwischenwände der Wagenabteilungen eingesetzt, dass jede Lampe ihr Licht an beide Abteilungen abzugeben vermag. Diese letztere Anordnung gestattet eine viel intensivere Ausnützung und zugleich eine bessere Verteilung des Lichtes, wodurch den Reisenden der Vorteil erwächst, in Bezug auf das ihm zugemessene Lichtquantum von dem gewählten Sitzplatze unabhängig zu sein.

Als Schaltung wird in der Regel die einfache Parallelschaltung angewendet und zeigt Fig. 9 eine der Praxis entnommene derartige Schaltung, bei welcher auch eine Verdunkelung und gänzliche Ausschaltung der Lampen möglich ist. Der Hauptausschalter kann hie-

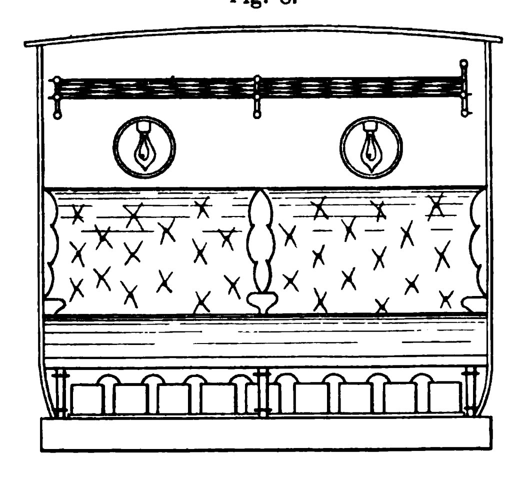
bei nur von dem Schaffner bedient werden, während die in den einzelnen Wagenabteilungen vorgesehenen Nebenausschalter den Reisenden zur freien Benützung überlassen werden. Wie zu ersehen ist, sind für

Fig. 7.



jede Abzweigung von der Hauptleitung die längs des ganzen Wagens verläuft, zu den einzelnen Lampen, Bleisicherungen angebracht. Für die beiden Hauptleitungen, die voneinander räumlich weit getrennt

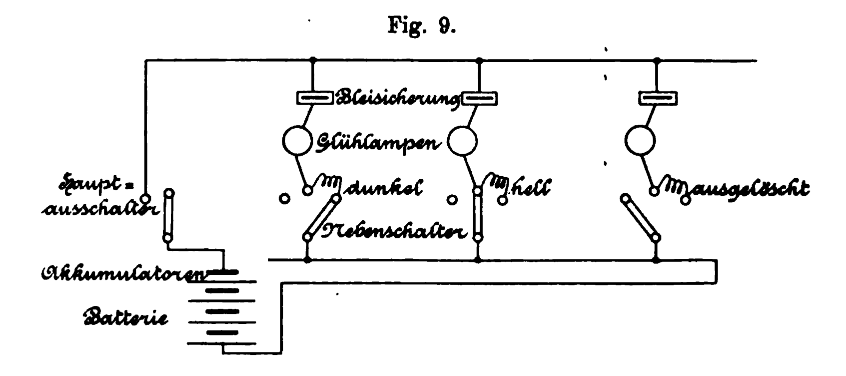
Fig. 8.



verlaufen, ist, da eine Berührung derselben nicht zu befürchten steht, und dieselben ausserdem so reichlich dimensioniert sind, dass eine gefährliche Erwärmung derselben ausgeschlossen ist, könnten die Bleisicherungen weggelassen werden.

Die vielen Variationen, welche sich in der Schaltungsanordnung durchführen lassen, können hier nicht berührt werden, doch sei hier darauf verwiesen, dass die Anbringung eines Ampèrestundenzählers, welcher für die gedachten Zwecke zu sehr billigem Preise hergestellt werden kann, sich sehr empfiehlt, damit eine über das Normale gehende Entladung der Batterien hintangehalten wird. Da die Kapazität der Batterien bekannt ist, gibt die Ablesung an diesem Zähler einen Anhaltspunkt für diejenige Dauer der Beleuchtung, welche die Batterie noch zu leisten vermag. An Stelle des Zählers kann auch ein Voltmeter verwendet werden, aus dessen Anzeigen sich ein Schluss auf den Zustand der Batterie ziehen lässt, ohne jedoch genauen Aufschluss darüber zu geben, wie viel Strom derselben bereits entnommen wurde.

Fig. 9.



Eine der schwierigsten Aufgaben bei Einführung der elektrischen Beleuchtung ist, die Kapazität der Akkumulatorenbatterien im vornehinein festzustellen, um den verschiedenartigsten Anforderungen, wie solche durch die Zahl der zu speisenden Lampen, die Laufdauer der Wagen, die Situierung der Ladestationen etc. gegeben sind, gerecht zu werden. So einfach dies an und für sich zu sein scheint, so ist dies gerade dasjenige, was bei nicht zutreffender Anordnung, wegen der damit verbundenen Manipulationsschwierigkeiten, die elektrische Beleuchtung in Misskredit zu bringen vermag, weil doch ein bestimmter und genauer Turnus für die Aufladung der Batterien festgesetzt werden muss. Das Bestreben soll dahin gerichtet werden, dass alle Wagen ohne Rücksicht auf den thatsächlichen Verbrauch an Elektrizität in gleichmässigem einheitlichen Turnus zur Ladestelle oder Depotstation behufs Aufladung bezw. Auswechselung der Batterien zurückkehren, wofür die längste Zeitdauer, welche ein für den internen Fernverkehr eingestellter Wagen von dem Zeitpunkte der Abfahrt

von der Ausgangsstation bis zur Rückkehr in dieselbe benötigt, als Grundlage anzunehmen sein wird.

Um die Zahl der zu einer Batterie zu vereinigenden Elemente möglichst zu reduzieren und auch den Spannungsabfall, wie solcher sich bei zunehmender Entladung der Batterien ergibt, nicht allzu gross werden zu lassen, wird man am besten Glühlampen von geringer Spannungserfordernis verwenden.

Gebräuchlich sind in dieser Beziehung Lampen für 16, 18 und 20 Volt Spannung. Für welche Spannung man sich entscheidet, bleibt sich im grossen und ganzen gleichgiltig. Sobald jedoch eine bestimmte Spannung gewählt ist, soll dieselbe, um die Lampen für alle Wagen verwenden zu können, auch beibehalten werden.

Nun erscheint es sicher von grossem Vorteile, ebenso wie für die Lampen, auch für die Akkumulatoren eine einheitliche Normaltype festzustellen und dieselbe allgemein zu verwenden.

Die Grösse der Zellentype wird sich der geringsten erforderten Kapazität anpassen und kann die für längere Beleuchtungsdauer erforderte erhöhte Kapazität durch Anwendung einer vermehrten Anzahl von Zellen, die den Bedürfnissen entsprechend parallel geschaltet werden, erreicht werden.

Um dies in einem Beispiele klarzulegen, sei für einen im Lokalverkehre eingestellten Wagen eine gesamte Lichtintensität von 100 Normalkerzen angenommen und die maximale Beleuchtungsdauer mit 9 Stunden täglich festgesetzt. Bei Annahme eines Stromverbrauches von drei Watt per Lampe und einer Spannung von 18 Volt berechnet sich die Kapazität einer aus neun in Serie geschalteten Zellen mit rund 150 Ampèrestunden, wenn die Batterie die volle Beleuchtung durch die erwähnten 9 Stunden aufrecht erhalten soll.

Wäre nun die maximale Beleuchtungsdauer eines mit der gleichen Anzahl von Lampen ausgerüsteten Wagens, welcher dem Fernverkehre dient, 36 Stunden, so müssten vier derartige Batteriesätze in den Wagen eingestellt werden, welche hiebei entweder alle vier zusammen oder in zwei Serien parallel geschaltet werden. Im ersteren Falle hat die gesamte Batterie die Beleuchtung für den Hin- und Rückweg zu besorgen, während bei der zweiten Anordnung die eine Batterie für den Hin-, die zweite hingegen für den Rückweg allein zur Benützung gelangt. Da ein derartiger Wagen, um in seine Bestimmungsstation zurück zu gelangen mindestens 48 Stunden benötigt, so kann er im günstigsten Falle jeden dritten Tag zur Neuaufladung der Batterien der Ladestelle zugeführt werden.

Zur Erzielung eines regelmässigen Ladeturnus kann jedoch auch die Einrichtung getroffen werden, dass auch die früher erwähnten Lokalwagen mit einer Batterie, welche für 36 Stunden Beleuchtungsdauer ausreichen, ausgerüstet werden.

In diesem Falle, welcher sich den praktischen Bedürfnissen am besten anzupassen scheint, wird man selbstredend, statt drei oder vier Batterien zu verwenden und dieselben parallel zn schalten, eine Akkumulatorenbatterie von solcher Kapazität wählen, dass dieselbe für die maximale Beleuchtungsdauer ausreicht.

Eine in dieser Beziehung wichtige Frage spielt auch das Akkumulatorengewicht. Dasselbe ist natürlich von der Konstruktion der gewählten Akkumulatorentype abhängig und schwankt nach den zur Verfügung stehenden Daten zwischen 55 und 135 kg für die abzugebende Kilowattstunde. Nimmt man eine Leistungsfähigkeit der Batterie von 9 Kilowattstunden und ein Gewicht von 100 kg pro abzugebende Kilowattstunde an, so ist das Gewicht der Batterien mit 900 kg bezw. nebst Akkumulatorenkasten mit 950 kg in Anschlag zu bringen. Es ergibt sich sonach, dass die Belastung der Wagen durch die Batterien selbst bei hohen Annahmen, diejenige nicht überschreitet, welche durch die Oelgasbeleuchtung hervorgerufen wird.

Bringt man jedoch an Stelle von dreiwattigen Lampen solche von einem Energieerfordernis von nur zwei Watt zur Anwendung, was sich, wie später noch gezeigt werden soll, trotz der geringen Lebensdauer dieser Lampen aus ökonomischen Gründen empfiehlt, so wird sich das reine Batteriegewicht noch um ca. 1/3 herabdrücken bezw. bei Beibehaltung dieses Gewichtes die mögliche Beleuchtungsdauer entsprechend verlängern lassen.

Ueber die Ladestationen und deren Einrichtung ist wenig zu sagen, da sich selbe mit allen gleichartigen Anlagen in der Anordnung so ziemlich decken und für die Ausgestaltung derselben lokale Verhältnisse zu sehr einwirken, als dass hiefür allgemeine Anhaltspunkte gegeben werden können.

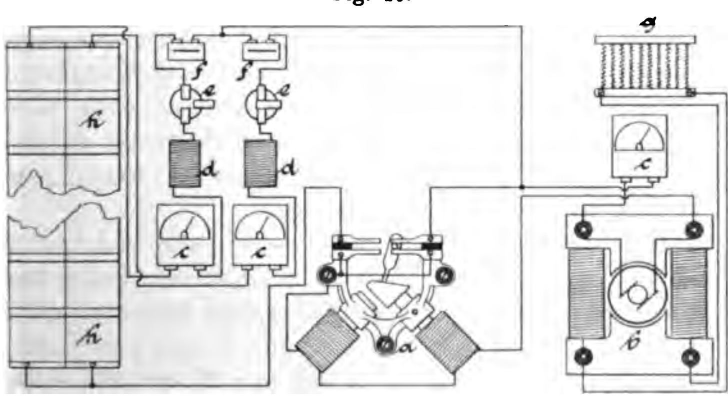
Es wird jedoch bei der Anlage auf den mit den Jahreszeiten sich ändernden Bedarf an Batterien Rücksicht zu nehmen sein, um für das ganze Jahr eine möglichst gleichmässige Ausnützung der Zentrale zu erreichen.

Bekanntlich sind in der wärmeren Jahreszeit durch die Vermehrung der Lokal- und Fernzüge, durch den häufigeren Bedarf an Erforderniszügen durch die Verstärkung der Zugsgarnituren etc. mehr Wagen in Dienst gestellt als in den Wintermonaten. Hingegen ist

die Beleuchtungsdauer während dieser Zeit eine viel kürzere, so dass sich hiedurch von selbst ein natürlicher Ausgleich ergibt.

Nun dürfen aber die Batterien der ausser Dienst gestellten Wagen nicht in ungeladenem Zustand aufbewahrt werden, sondern müssen, um selben eine möglichst lange Lebensdauer zu sichern, auch wenn sie nicht im Betriebe sind, von Zeit zu Zeit, aber mindestens alle drei Wochen einmal aufgeladen werden. Um dieses periodische Aufladen dieser Batterien hintanzuhalten, dürfte es einen wesentlichen Vorzug bedeuten, wenn die im Depot befindlichen Batterien sich fortwährend in Ladung befinden und die in denselben aufgespeicherte Energie zum Laden der Gebrauchsbatterien verwertet wird. Man erhält hiedurch fast das ganze Jahr über eine annähernd gleiche Belastung der Lademaschine und lassen sich daher die eigentlichen

Fig. 10.



Elektrizitätserzeugungskosten infolge dieser günstigen Verhältnisse auf ein sehr tiefes Nieveau herabdrücken.

In Fig. 10 ist nur zur allgemeinen Orientierung ein Schaltungsschema einer kleineren Ladestation gegeben, welches kaum mehr einer Erläuterung bedarf. Die zur Verwendung gelangende Dynamomaschine ist zur Erzielung konstanter Spannung eine Nebenschlussmaschine. Bemerkenswert hiebei ist nur der automatische Ausschalter a, welcher, sobald die Spannung der Akkumulatorenbatterien grösser ist als die der Dynamomaschine, letztere von den Akkumulatoren abschaltet und so eine Entladung derselben in der Maschine verhindert.

Die nunmehr zur Besprechung gelangenden Methoden des gemischten Betriebes haben das Gemeinsame, dass während der

Fahrt des Zuges eine mit irgend einer Wagenachse gekuppelte Dynamomaschine den Beleuchtungsstrom liefert und auch die Batterien ladet, wogegen die Batterien die Beleuchtung während der Zeit des Stillstandes der Züge, oder wenn die Bewegung des Zuges noch nicht hinreichend gross ist, um in der Dynamomaschine die erforderliche Spannung zu erzeugen, übernehmen.

Wie sich hieraus von selbst ergibt, sind jene Methoden der gemischten Beleuchtung, für welche ein eigener Krafterzeuger (Dampfmaschine, Benzin- oder sonstiger Motor) mitgeführt wird und welcher den Antrieb der Lichtmaschine besorgt, als von nur sekundärer Bedeutung von der Betrachtung ausgeschlossen.

Bei diesen Arten der elektrischen Zugsbeleuchtung muss vor allem darauf Rücksicht genommen werden, dass sich der Zug nicht stets in einer Richtung bewegt, indem derselbe auch häufig nach rückwärts verschoben wird. Dies bedingt nun bei Kuppelung des Ankers der Dynamomaschine mit einer der Zugachsen eine entgegengesetzte Drehrichtung desselben und sohin auch eine Umkehrung der Stromrichtung. Da jedoch der Strom nur stets in einer Richtung, welche durch die Schaltung der Akkumulatorenbatterien gegeben ist, verlaufen darf, muss eine Vorrichtung geschaffen werden, welche diesen Wechsel der Stromrichtung hintanhält.

Die Umlaufgeschwindigkeit des Ankers passt sich der Zugsgeschwindigkeit an und schwankt daher innerhalb sehr weiter Grenzen. Mit diesem Wechsel der Tourenzahl des Ankers hält aber die Spannung der von der Dynamomaschine erzeugten Ströme gleichen Schritt. Eine gleichmässige oder nahezu gleichmässige Maschinenspannung ist aber für einen regelrechten Beleuchtungsbetrieb unbedingtes Erfordernis, weshalb auch Vorkehrungen zu treffen sind, dieser Bedingung Rechnung zu tragen.

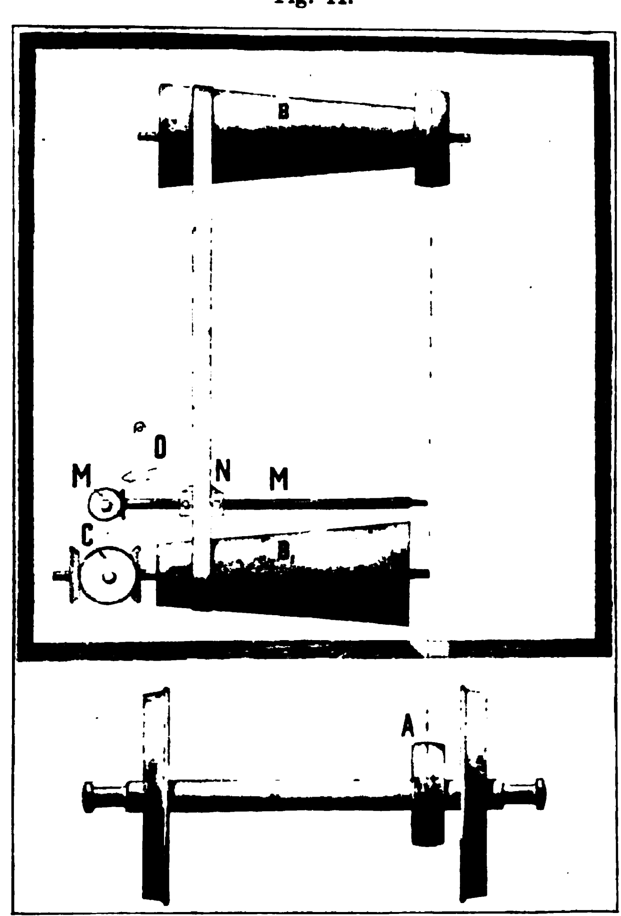
Eine weitere Notwendigkeit besteht darin, die Dynamomaschine von den Leitungen und Batterien so lange abgeschaltet zu halten, bis die von derselben erzeugte Spannung das Normale erreicht hat, weil sonst eine Entladung der Batterien in die Maschine zu befürchten wäre.

Dies alles bedingt die Einführung einer Reihe von selbstthätig wirkenden Vorrichtungen, von deren sicherem Zusammenwirken die Zuverlässigkeit der Beleuchtung abhängt.

Die Akkumulatorenbatterien haben hier nur als Ausgleicher und Reserve zu wirken, weshalb deren Kapazität bedeutend geringer bemessen werden kann, als bei der reinen Akkumulatorenbeleuchtung. Man wird jedoch gut daran thun, dieselbe nicht zu gering anzunehmen,

da das Versagen der Beleuchtung bei eintretenden Betriebsstörungen in seinen Folgen nicht zu ermessen ist und die elektrische Beleuchtung in Misskredit zu bringen vermöchte. Es wird daher eine solche Kapazität zu wählen sein, dass die Akkumulatoren die Beleuchtung im Minimum durch vier Stunden allein zu übernehmen im stande sind.


Fig. 11.

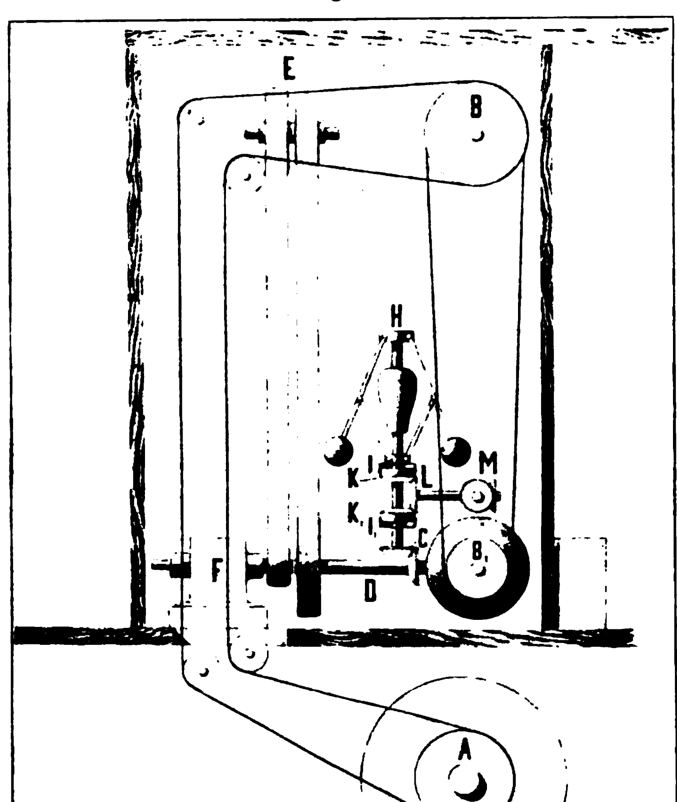


Zur Durchführung dieser Art Zugsbeleuchtung wurden eine Reihe von Systemen teilweise in Vorschlag gebracht und teilweise auch praktisch erprobt, die hier der chronologischen Reihenfolge nach vorgeführt werden sollen.

Das System von Löbbecke und Oesterreich. Dieses auf der Strecke zwischen Frankfurt a. M. und Fulda und späterhin auch

auf den württembergischen Staatsbahnen zwischen Immendingen und Stuttgart erprobte System sucht durch mechanische Vorrichtungen die Umdrehungszahl des Ankers konstant zu erhalten, sobald die Zugsgeschwindigkeit ein gewisses Minimum überschritten hat. Diese Geschwindigkeit wurde mit 30 km festgesetzt und muss, sobald der

Fig. 12.

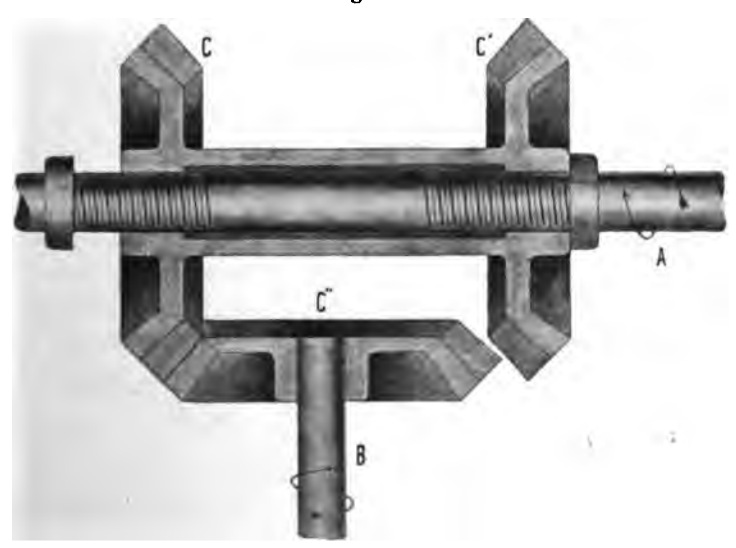


Zug diese Geschwindigkeit nicht erreicht, die Dynamo von der Leitung automatisch abgeschaltet und die Speisung der Lampen von der Akkumulatorenbatterie übernommen werden.

Diese konstante Geschwindigkeit wird durch die in Fig. 11 und 12 dargestellte Vorrichtung bedingt. Auf einer Achse des Gepäckwagens sitzt die Riemenscheibe A, von welcher über zwei Führungsrollen

laufend, der Treibriemen abgeht und die konische Trommel B antreibt. Ein zweiter Treibriemen treibt nun von B aus die konische Trommel B^1 an. Auf der Achse A von B^1 sitzt nun (Fig. 13) das aus zwei unter sich starr verbundenen Kegelrädern CC^1 bestehende Wechselgetriebe, welches sich längs des in die Achse eingeschnittenen Gewindes je nach der Drehrichtung der Trommel nach rechts oder links verschiebt, so dass entweder das Kegelrad C oder das Kegelrad C^1 in das Kegelrad C'' eingreift. Durch diese Anordnung vermag sich die Welle B nur stets in einer Richtung zu drehen. Diese Welle, welche in Fig. 12 mit D bezeichnet ist, treibt nun durch das Vor-

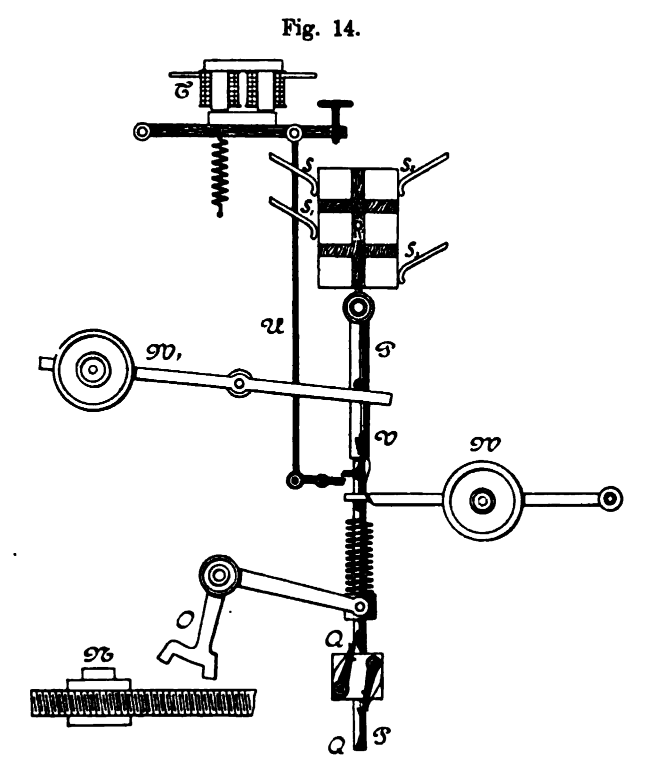

Fig. 13.



gelege E die mit F bezeichnete Dynamomaschine an und vermag sich dieselbe sohin nur immer in einer und derselben Richtung zu drehen. Auf der Achse D ist ferner ein Kegelrad befestigt, welches in das horizontale Kegelrad G des Zentrifugalregulators H eingreift und denselben gleichfalls in rotierende Bewegnng versetzt. Durch das Spiel des Zentrifugalregulators wird nun entweder der Konus I in das Kegelrad K oder der Konus I_1 in das Kegelrad K_1 eingepresst und nimmt nun eines der beiden Kegelräder, das Kegelrad L, mit und bringt dasselbe in Umkehrung des Vorganges wie bei Gleichrichtung der Drehung entweder in eine rechts- oder linksseitige Rotation, durch welche vermittelst der Kegelradübersetzung bei M die Leitspindel M (Fig. 11) in Drehung versetzt wird, was eine Verschiebung des

Riemenlenkers N und des über die konischen Trommeln BB_1 laufenden Riemens bedingt. Da sich der Riemenlenker einmal von rechts nach links und das anderemal von links nach rechts und zwar genau der Bewegung des Zentrifugalregulators folgend verschiebt, so wird, nachdem sich durch das Verschieben des Riemenlenkers auch das Uebersetzungsverhältnis zwischen B und B^1 proportinal ändert, fast stets genau die normale Geschwindigkeit der Trommel B_1 und damit auch der Dynamomaschine und des Zentrifugalregulators hergestellt.

Fig. 14.



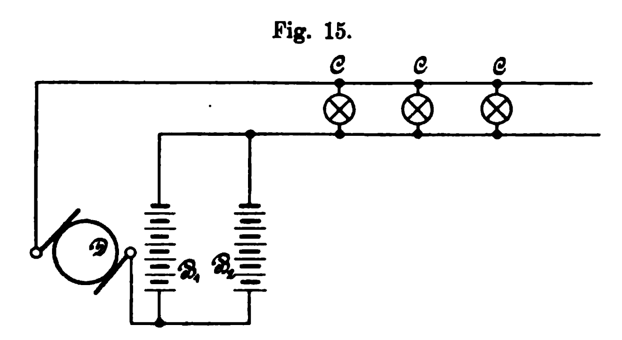
Sinkt die Zugsgeschwindigkeit unter 30 km pro Stunde, so verschiebt sich der Riemenlenker N so weit nach links, dass er an den Hebel O anstösst und denselben mitnimmt. Hiedurch wird der in Fig. 14 zur Anschauung gebrachte Momentausschalter bethätigt, welcher den Zweck hat, die Dynamomaschine D aus dem Stromkreis der Lampen aus- und die beiden vorgesehenen Akkumulatorenbatterien in Serie zur Speisung der Glühlampen zu schalten.

So lange die Dynamomaschine D Strom liefert, durchfliesst derselbe die Glühlampen und geht dann, wie dies Fig. 15 schematisch

darstellt, in die in zwei Gruppen parallel geschalteten, im Gepäckwagen untergebrachten Akkumulatorenbatterien, ladet dieselben und kehrt zur Maschine zurück. Nach Abschalten der Maschine stellt sich die in Fig. 16 zur Anschauung gebrachte Schaltung her.

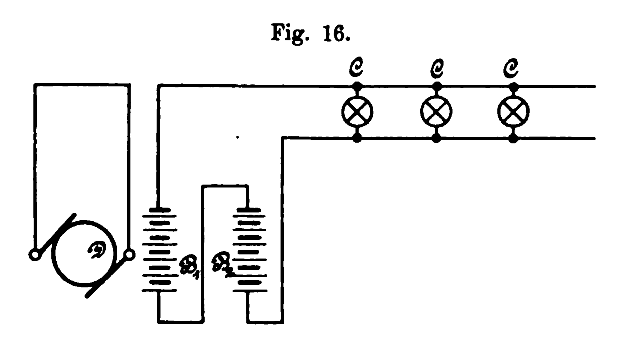
Die Wirkung des Momentausschalters, der diese Umschaltung besorgt, erklärt sich nun folgendermassen: Sobald der Hebel O nach

Fig. 15.



rechts verschoben wird, spannt sich die über das Gestänge P (Fig. 14) gesteckte Spiralfeder, wobei dieses Gestänge, dem Druck von O nachgebend, nach rechts ausweicht. Hiedurch wird auch das an diesem Gestänge befestigte Auflageprisma seitlich von dem Haken Q verschoben und die Aufwärtsbewegung von P freigegeben. Das Gestänge wird nun infolge der Federspannung in die Höhe geworfen. Am Ende

Fig. 16.



dieser Bewegung fängt der zweite Hacken das Auflageprisma Q_1, wodurch der Verbleib des Gestänges in dieser Endstellung gesichert ist. Durch diese Aufwärtsbewegung von P wird nun auch das Gewicht W und der Umschalter R gehoben. Hiebei speichert das Gewicht die zur rückläufigen Bewegung von P erforderliche Kraft auf, während R die Umschaltung vollzieht, indem die Schleiffedern S, S_1, S_2, S_3 auf andere Kontaktflächen zu liegen kommen. Erlangt nun der Zug

nach und nach wieder die Fahrgeschwindigkeit von 30 km, so schiebt sich der Riemenlenker N durch die Wirkung des Zentrifugalregulators nach links, der Hebel O senkt sich und das Gestänge P geht, der Kreisbewegung folgend, ebenfalls nach links und das Auflageprisma Q_1 verliert die Unterlage. Hiedurch senkt sich P, sowohl durch das eigene als das Gewicht W getrieben, nach abwärts, mit ihm gleichzeitig R und die Dynamomaschine wird wieder auf die Lampen geschaltet.

Bei plötzlicher Unterbrechung des Maschinenstromes tritt der mit diesem Umschalter in Verbindung stehende Sicherheitsapparat in Thätigkeit. Der Elektromagnet T lässt nämlich seinen Anker los, drückt die Stange U nach abwärts, hiedurch den rechten Arm derselben nach aufwärts. Letzterer trifft den kleineren Arm des Hebels V, nimmt ihn mit, wodurch sich der nach aufwärts ragende Arm von V von dem Auflageprisma abhebt und nun das Gewicht W_1 zur Wirkung bringt, welches die obere Hülse von P samt R in die Höhe schiebt und die Akkumulatoren wieder auf Beleuchtung schaltet.

Diese äusserst sinnreich kombinierte Einrichtung erwies sich jedoch infolge ihrer Kompliziertheit als nicht vollkommen zuverlässig.

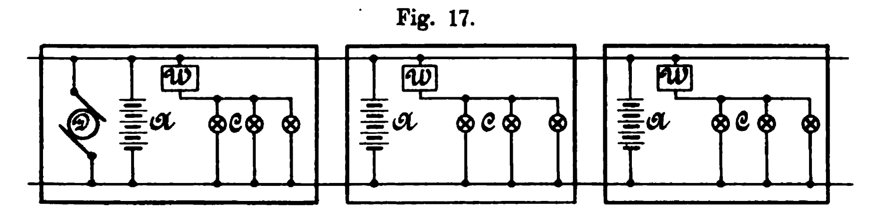
Das System der elektrotechnischen Fabrik in Cannstatt. Anstatt wie bei dem vorbeschriebenen Systeme die Dynamomaschine durch mechanische Regulierung mit stets gleicher Tourenzahl laufen zu lassen und so die konstante Spannung zu erzielen, wird hier die Dynamomaschine direkt durch einen Riemen von einer Wagenachse aus angetrieben und auf elektrischem Wege dafür Sorge getragen, den von der Dynamomaschine gelieferten Strom in den richtigen Grenzen zu halten.

Es ist bei dieser Einrichtung auch dafür Sorge getroffen, die einzelnen Wagen voneinander unabhängig zu machen, um die Zugsteile nach Bedarf trennen zu können. Zu diesem Zwecke war in jedem Wagen eine Akkumulatorenbatterie von solcher Kapazität untergebracht, dass selbe die in demselben angeordneten Glühlampen durch 5 Stunden lang zu speisen vermochte.

Bei Zusammenstellung eines Zuges wurden die Batterien sämtlicher Wagen unter sich parallel geschaltet und zeigte sich hiebei, dass die Batterien, welche naturgemäss nicht die gleichen Ladungsverhältnisse besitzen konnten, sich in ihren Wirkungen gegenseitig ausglichen und bestrebt waren, den gleichen Ladungszustand zu erreichen.

Die Schaltungsanordnung dieser Einrichtung ist aus Fig. 17 zu entnehmen und bezeichnet hier D die Dynamomaschine, A die Akkumulatorenbatterien, C die Glühlampen und W einen vor die Glühlampen vorgeschalteten Widerstand. Die Einschaltung dieses Wider-

Fig. 17.



standes erfolgte durch einen Regulator, welcher der Hauptsache nach aus einer an die Hauptleitung gelegten, also parallel zu den Glühlampen geschalteten Spule S (Fig. 18) besteht, die gleichfalls von einem von der Akkumulatorenspannung abhängigen, daher veränderlichen Strom durchflossen wird. Durch diesen Strom wird der Kern K mehr oder weniger in die Spule hineingezogen und damit unter Vermittelung der Feder F und des Kontaktes C der Widerstand W in den Stromkreis ein- oder ausgeschaltet, je nachdem die Akkumulatoren Strom abgeben oder empfangen. Der Zweck dieses Regulators war der, die Spannungsdifferenz, welche sich an den Klemmen der Akkumulatoren während der Periode der Ladung und Entladung ergibt, auszugleichen. Da sich jedoch bei diesem Aus- und Einschalten des Widerstandes jedes-

Fig. 18.

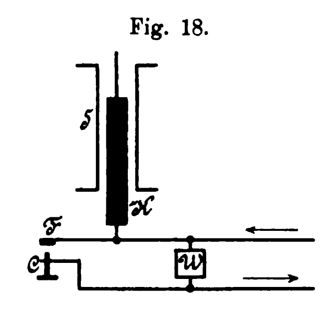
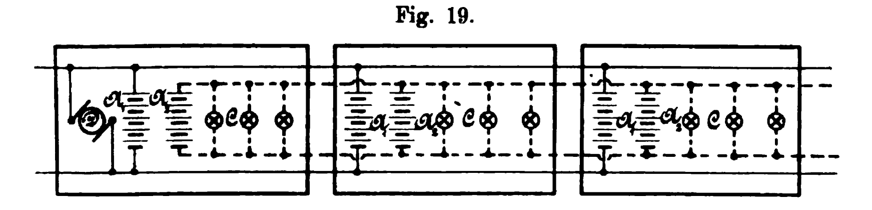


Fig. 19.

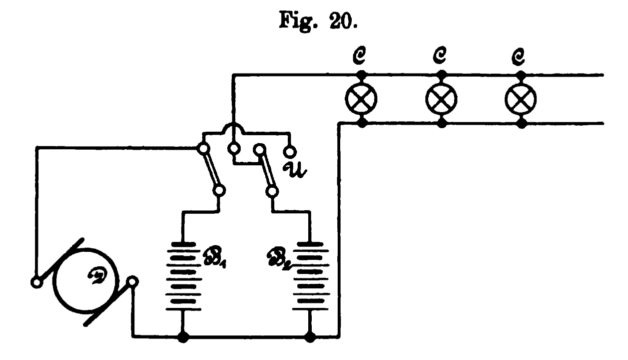


mal ein leichtes Zucken des Lichtes bemerkbar machte, wurde die allerdings grössere Kosten verursachende Einrichtung, deren Schaltung aus Fig. 19 ersichtlich ist, gewählt. Hier wurden in jedem Wagen zwei Sätze von Akkumulatoren B_1 und B_2 untergebracht, von denen der eine Satz mit der durch den ganzen Zug führenden Hauptleitung, der andere

mit dem Glühlampenstromkreis in Verbindung steht. Es wird hiebei also abwechselnd eine Batterie geladen, die andere entladen und sodann, nach erfolgter Erschöpfung der die Lampen speisenden Batterie, durch einen Umschalter (Fig. 20) die Schaltung in der Weise gewechselt, dass die entladene Batterie an die Hauptleitung, die geladene Batterie in den Lampenstromkreis eingeschaltet wird. Dieses Umschalten hat der Schaffner alle 4 bis 5 Stunden einmal zu besorgen.

Die Dynamomaschine wird von einer Achse des Gepäckwagens direkt angetrieben, folgt daher in ihrer Umdrehungszahl der Geschwindigkeit des Zuges. Aber auch hier muss bei zu geringer Fahrgeschwindigkeit ein selbstthätiger Ausschalter die Verbindung zwischen Batterien und Dynamomaschine unterbrechen, weil sich sonst die Batterie in diese Maschine entladen würde. In gleicher Weise ist der von der Dynamomaschine gelieferte Strom durch einen selbst-

Fig. 20.



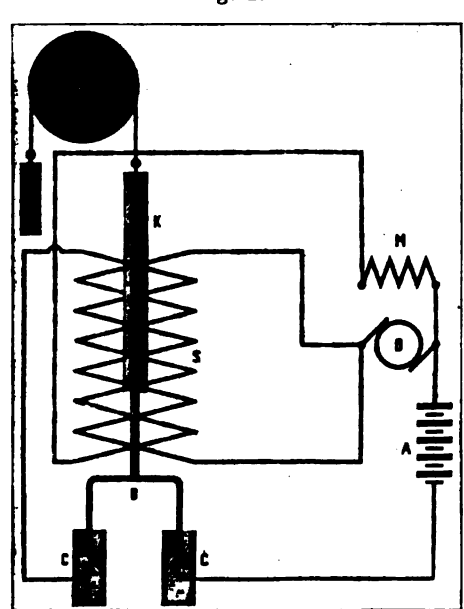
thätigen Stromregulator in den richtigen durch die Grösse der Akkumulatorenbatterien gegebenen Grenzen zu halten.

Der selbstthätige Ausschalter besteht (Fig. 21) aus einem Solenoid S mit zwei Wickelungen, deren eine mit starken Windungen in dem Hauptstromkreis, die andere hingegen mit dünnen Windungen in dem Magnetstromkreis der Dynamomaschine liegt, wobei beide Wickelungen in gleicher Richtung vom Strome durchflossen werden. Der in den Spulen steckende Kern K wird, solange die Spulen stromlos sind, durch ein Gegengewicht in die Höhe gehalten. Der Kern K trägt an seinem unteren Teile B eine Kupfergabel, deren beide Zinken bei der tiefsten Stellung in die mit Quecksilber gefüllten Näpfchen $C\,C^1$ eintauchen und so die leitende Verbindung zwischen denselben herstellen. Bei Stillstand des Zuges ist der Kern K in die Höhe gehoben, unterbricht die Verbindung zwischen $C\,C^1$ und kann infolgedessen die Batterie A keinen Strom durch die Maschine D entsenden.

Bei Bewegung des Zuges erregt sich die Dynamo und der durch Strichlinien angedeutete Magnetstromkreis wird von dem induzierten Strome durchflossen und zieht daher diese Spule den Kern K nach Massgabe der wachsenden Stromintensität solange nach abwärts, bis der Kupferbügel B in die beiden Näpfchen CC[1] eintaucht und die Akkumulatorenleitung schliesst, so dass nunmehr die Maschine die Akkumulatoren ladet.

Durch das Schliessen des Hauptstromkreises wird nun zwar die Intensität des Magnetstromkreises etwas geschwächt, da aber die

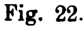
Fig. 21.

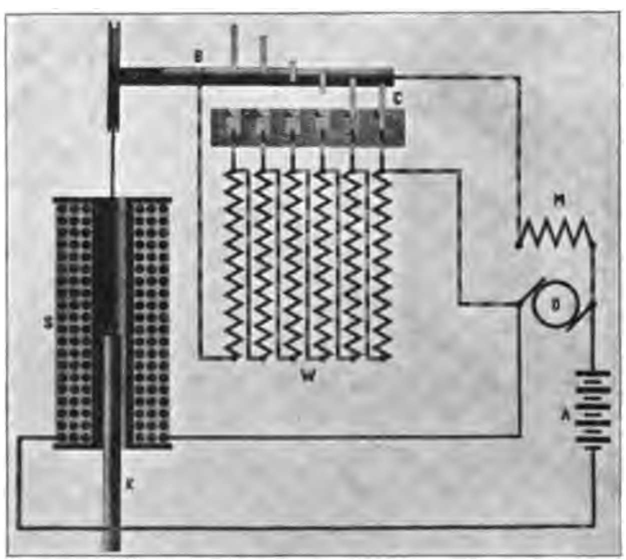


starken Windungen des Solenoides nunmehr auch stromdurchflossen sind, unterstützen selbe die dünnen Windungen in ihrer Wirkung, so dass ein Rückschnellen des Kernes solange nicht stattfindet, bis bei sinkender Zugsgeschwindigkeit das Gegengewicht die Oberhand erhält und der Akkumulatorenstromkreis neuerdings unterbrochen wird. Durch passende Abstimmung der Spulen und des Gegengewichtes wird nun erreicht, dass der Batteriestromkreis erst dann geschlossen wird, wenn die Klemmenspannung der Dynamomaschine die vorher festgesetzte Grenze erreicht hat.

Um zu verhüten, dass die Spannung mit zunehmender Zugsgeschwindigkeit anwächst, wird der in Fig. 22 dargestellte Strom-

regulator angewendet. Derselbe besitzt eine in dem Hauptstromkreis der Dynamo liegende Spule S mit dem Eisenkern K, welcher nach Massgabe der anwachsenden oder nachlassenden Stromstärke entweder in die Spule hineingezogen wird oder nach abwärts sinkt. Diese auf- und abgehende Bewegung wird durch Schnur und Rolle in eine drehende der Welle B verwandelt. In diese Welle sind in schraubenförmiger Anordnung Zinken eingesetzt, welche je nach der Stellung von K in die einen oder die anderen der mit Quecksilber gefüllten Rinnen C eintauchen und Widerstände W in den Magnetstromkreis der als Nebenschlussmaschine gewickelten Dynamo entweder ein- oder


Fig. 22.



ausschalten und so die Erregung schwächen oder verstärken. Steigt sohin der Strom der Maschine, so werden Widerstände ein-, sinkt er dagegen, Widerstände ausgeschaltet. Durch Verstellung einer Kurbel war es ferner ermöglicht, den Regulator, entsprechend der mit Strom zu versehenden Anzahl Wagen, auf verschiedene Stromstärken einregulieren zu lassen.

Damit die Dynamomaschine sowohl bei Vor- als auch Rückwärtsgang des Zuges stets Strom derselben Richtung entsende, wurden auf dem Kollektor senkrecht stehende Bürsten angewendet, welche bei jedem Wechsel der Fahrt daher auch Drehrichtung der Maschine durch die Reibung auf dem Kollektor bis zu einem Anschlag

in die für die Drehrichtung und Stromstärke passende Stellung mitgenommen wurden.

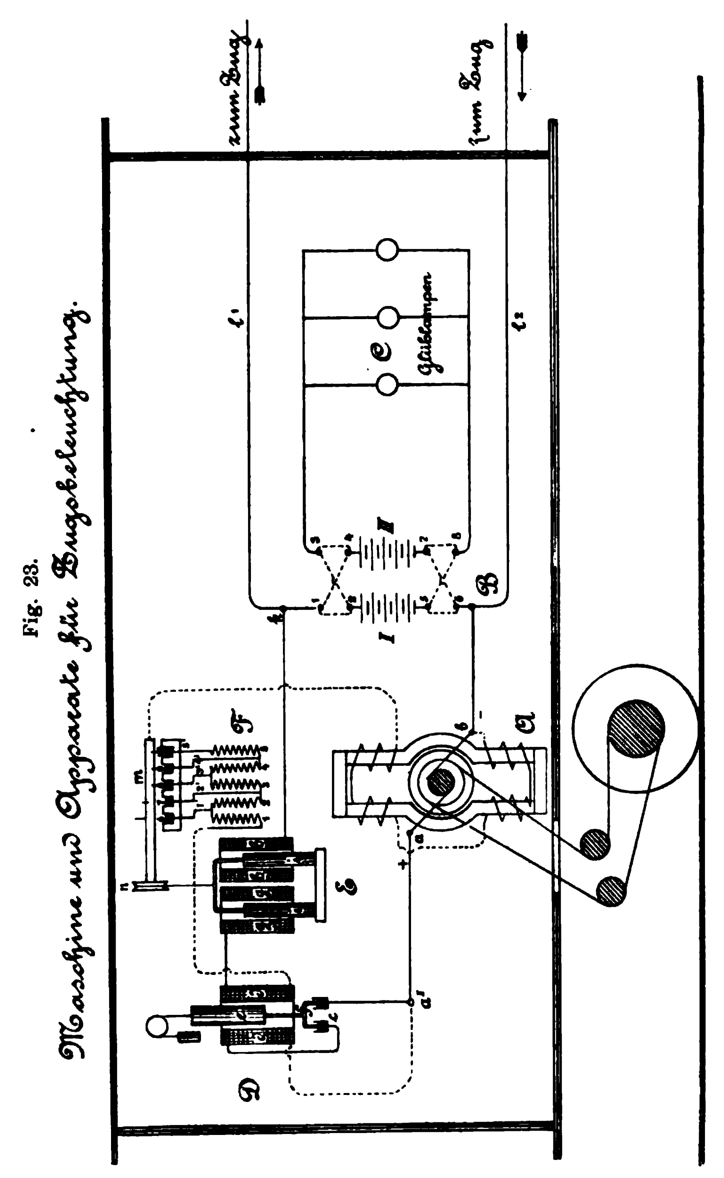


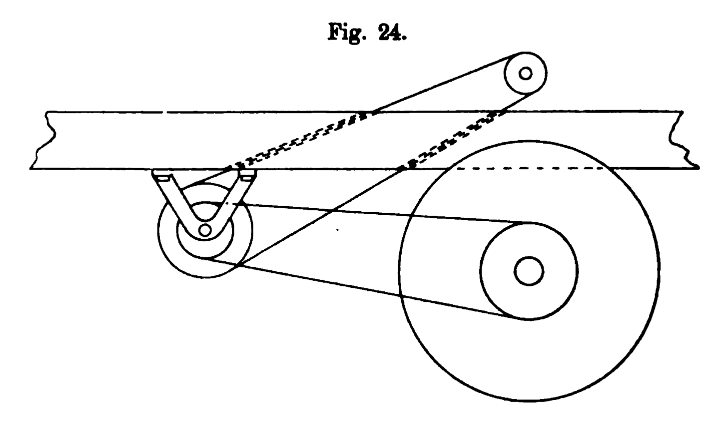
Fig. 23.
Maschine und Apparate für Zugsbeleuchtung.

Das Zusammenwirken aller Teile dieser Einrichtung lässt sich auf Grund des vorhergehend Gesagten, ohne weitere Erläuterung aus der in Fig. 23 gegebenen schematischen Darstellung, herausfinden.

Diese Einrichtung wurde in den Jahren 1888 bis 1890 auf der Strecke Stuttgart—Hall in probeweise Verwendung genommen und soll sich daselbst auch gut bewährt haben. Infolge allgemeiner Einführung der Oelgasbeleuchtung auf sämtlichen Linien der königl. württembergischen Eisenbahnen wurden jedoch diese Versuche, die vielversprechend waren, wieder aufgegeben.

Das System von W. E. Langdon. Bei diesem von der Midland-Railway in dem Jahre 1889 bis 1891 zur Erprobung gelangten Systeme ist die Dynamomaschine im Gepäckwagen untergebracht und wird der Antrieb derselben gleichfalls mittels Riemenübertragung, deren Anordnung in Fig. 24 skizziert erscheint, bewerkstelligt. Der Anforderung, dass die Dynamomaschine erst dann Strom in die Lampen und Akkumulatoren entsenden darf, wenn derselbe die hinreichende

Fig. 24.



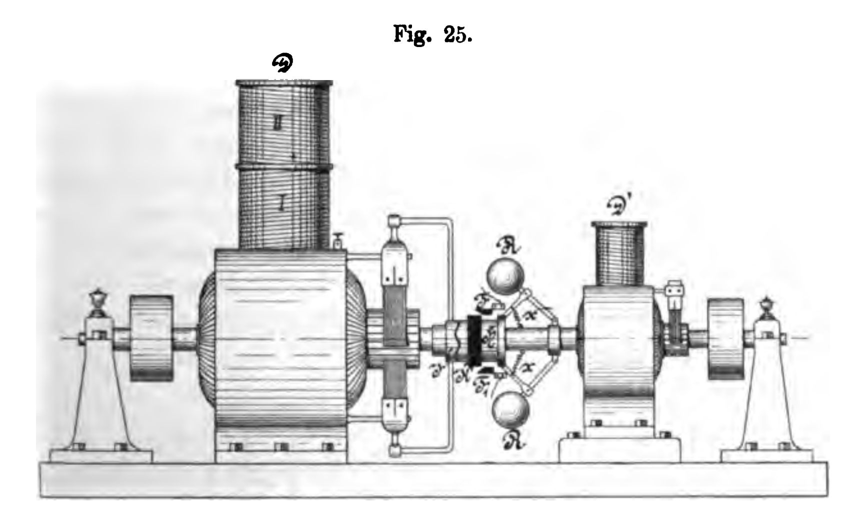
Stärke, die ja von der Tourenzahl der Dynamotrommel abhängt, erlangt hat, wird hier auf rein mechanischem Wege entsprochen. Zu dem Zwecke ist der an der Dynamowelle befestigte Zentrifugalregulator R (Fig. 25) so eingestellt, dass die über die Welle aufgeschobene lose Hülse H mit dem an derselben befestigten Kontaktring K erst bei einer Tourenzahl von 800 pro Minute so weit nach rechts verschoben wird, um die beiden Kontaktfedern FF^1 durch denselben in leitende Verbindung zu bringen. Ausserdem wird zur Erhöhung der Sicherheit noch ein selbstthätig wirkender elektromagnetischer Ausschalter im Nebenschluss zur Dynamomaschine eingeschaltet, welcher erst bei der bestimmten Stromstärke durch Anziehung eines Elektromagneten die Verbindung mit den Akkumulatorenbatterien herstellt. Dieser Ausschalter erscheint hier nicht dargestellt.

Zur Erreichung einer stets gleichen, von der Tourenzahl un-

abhängigen Stromstärke bediente sich **Langdon** einer kleinen Hilfsdynamo D^1, deren Trommel auf der gleichen Welle wie die der Hauptdynamo D befestigt war.

Die Feldmagnete der Lichtdynamo sind mit zwei Magnetisierungsspiralen voneinander entgegengesetzter Windungsrichtung I, II versehen, deren eine den Strom von der Hauptdynamo, die andere hingegen von der Hilfsdynamo erhält. Durch eine mit dem Zentrifugalregulator in Verbindung stehende, hier nicht dargestellte Vorrichtung wurde die Anordnung getroffen, dass der Strom der Hilfsdynamo erst nach Erreichung der vorgeschriebenen Umdrehungszahl in die Feldmagnetwickelung der Hauptdynamo entsendet werden konnte. Die

Fig. 25.



Wirkung dieser Hilfsdynamo ist nun eine derartige, dass sie die Felderregung in der Hauptdynamo schwächt und so die Wirkung der Hauptmaschine teilweise aufhebt. Eine ähnliche Wirkung hätte sich nun auch mit einer Compoundmaschine erzielen lassen, allein für diese Anordnung war der Umstand massgebend, dass die Hauptmaschine als Nebenschlussmaschine gewisse Aenderungen in der Spannung nach Massgabe der Variationen des äusseren Widerstandes zulässt, sich somit zur Ladung von Akkumulatoren, bei welchen die Spannung des Ladestromes im Verhältnis zum Fortschritte der Ladung steigen soll, besser eignet.

Die gleiche Stromrichtung des von der Hauptdynamo abzugebenden Stromes, sowohl bei der Vor- als Rückwärtsbewegung des Zuges, wird durch Anwendung zweier Bürstenpaare (Fig. 26) erreicht. Die

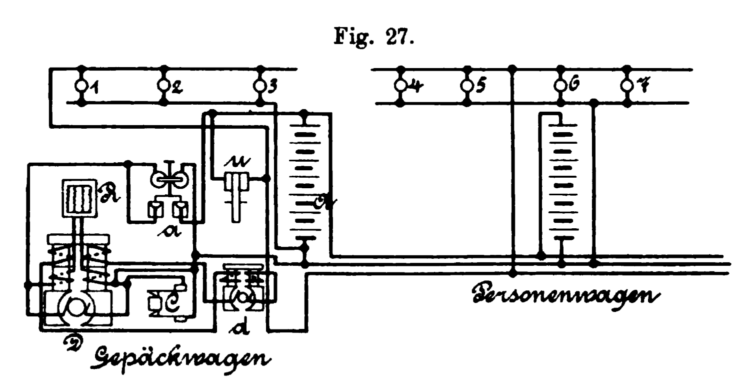
beiden Bürsten jedes Paares stehen in einem ganz bestimmten Winkel voneinander ab und liegt sohin nur eine Bürste jeden Paares an den Kollektor an. Bei der entgegengesetzten Drehrichtung wird nun die andere Bürste angelegt, indem die Hülse H die Muffe J zu Beginn der Drehung mitnimmt und hiedurch die Bürsten verdreht. Vorsteckstifte hindern eine zu weite Verdrehung der Bürsten und überschnappt sodann die Hülse H, welche nur durch die Federn x x festgepresst wird, solange, bis der Zentrifugalregulator jene Geschwindigkeit erreicht hat, welche diese Hülse gänzlich abhebt.

Fig. 26.

Die Akkumulatorenbatterien waren unter den Sitzbänken der Wagen untergebracht und gelangten für jeden Wagen 18 Akkumulatoren zur Verwendung.

Die bei diesem Systeme angewendete Art und Weise der Leitungsverbindungen ist aus dem in Fig. 27 gegebenen Schaltungsschema zu entnehmen und bedeutet in demselben: D die Hauptdynamo, d die Hilfsdynamo, A die Akkumulatorenbatterien, a den elektrischen Ausschalter zum selbstthätigen Ein- und Ausschalten der Akkumulatorenbatterien, C den Kontakt beim Zentrifugalregulator, R einen Handrheostat zum Regulieren des Widerstandes nach Massgabe der in den Zug eingestellten Anzahl von Wagen und U den Hauptschalter.

Fig. 27.



Wie aus diesem Schema ersichtlich, durchlaufen den ganzen Zug drei Leitungen, die von Wagen zu Wagen gekuppelt werden müssen. Fig. 28 Schnitt und Fig. 29 Ansicht von vorne geben ein Bild der hiefür verwendeten Kuppel. Dieselbe ist so eingerichtet, dass bei Lösung der Kuppel die Lampen eingeschaltet werden. Um nun diese selbstthätige Entzündung der Lampen beim letzten Wagen zu be-

hindern, wird die Kuppel des letzten Wagens in eine Blindmuffe gesteckt.

Dieses System stand auf der Linie London—Manchester—Liverpool der Midland-Railway in den Jahren 1889 bis 1891 im Betriebe und funktionierte allerdings bei ausgezeichneter Wartung zufriedenstellend. Als Nachteil wurde der Riemenantrieb bezeichnet, welcher

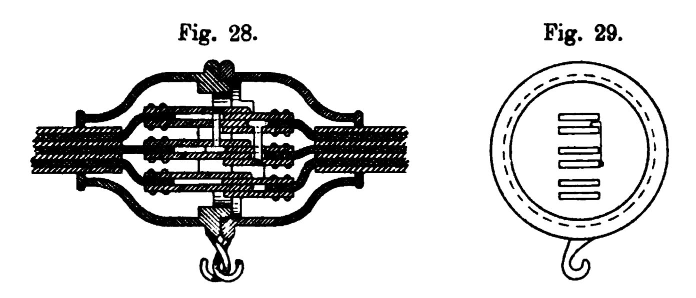
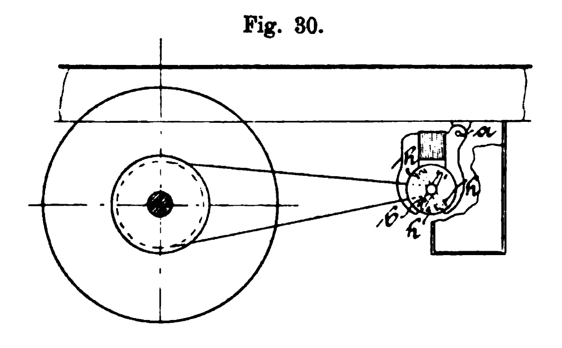


Fig. 28. Fig. 29.

infolge der wechselnden Spannungen ein reguläres Arbeiten sehr erschwerte, so dass man späterhin den Plan fasste, für den Antrieb der Dynamo eine eigene Betriebsmaschine aufzustellen, die den Dampf von der Lokomotive erhalten sollte.

Das System J. Stone & Co. Bei diesem Systeme wird die stets konstante Spannung des von der Dynamomaschine gelieferten

Fig. 30.

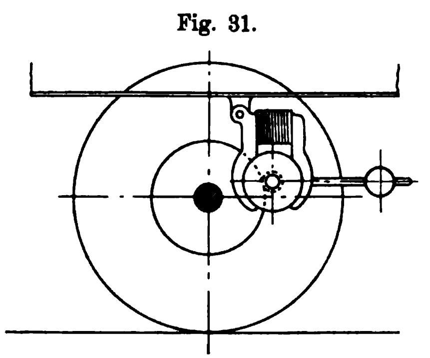


Stromes dadurch erzielt, dass jedem Bestreben, die Tourenzahl der Dynamomaschine über das festgesetzte Normale zu erhöhen, durch Gleiten des Riemens begegnet wird. Wie zu ersehen, ist bei diesem Systeme der Riemenantrieb gewählt und wird selber gleichzeitig zur Regulierung der Tourengeschwindigkeit verwertet. Die Dynamomaschine wird hiebei an der Unterseite des Wagenkastens an eine Achse a aufgehängt (Fig. 30) und zeigt das Bestreben, eine geneigte Lage einzunehmen. Erst durch den Riemen wird die Dynamomaschine

in die dargestellte senkrechte Lage gebracht und umgekehrt wieder der Riemen durch das Gewicht der Dynamo in Spannung erhalten. Die Spannung des Riemens lässt sich nun entweder durch ein an der Dynamomaschine angebrachtes Gegengewicht oder dadurch, dass der Aufhängepunkt derselben durch ein Handrad vom Wageninnern aus verstellt wird, derart bemessen, dass ein Gleiten des Riemens eintritt, sobald die Dynamo an der Grenze der festgesetzten Tourenzahl anlangt.

Die Wirkung dieser Art der Regulierung der Tourenzahl der Dynamomaschine lässt sich aus der exzentrischen Aufhängung derselben erklären. Steigert sich nämlich die Tourenzahl über das gegebene Normale, so wird die Dynamo infolge der Fliehkraft aus der Ruhelage gebracht und nähert sich der Riemenscheibe, hiedurch die Spannung des Riemens so weit verringernd, dass er zu gleiten beginnt.

Fig. 31.



Bei der in Fig. 31 dargestellten Art und Weise des Antriebes mittels gerippter Friktionsscheiben wird die gleichfalls exzentrisch aufgehängte Dynamo durch die Fliehkraft von der Antriebsscheibe abgehoben und es findet ein Gleiten der Triebscheibe derselben statt.

Nach Untersuchungen von Professor Dr. Wedding in Charlottenburg soll sich die Umdrehungszahl der Dynamo thatsächlich nicht verändern.

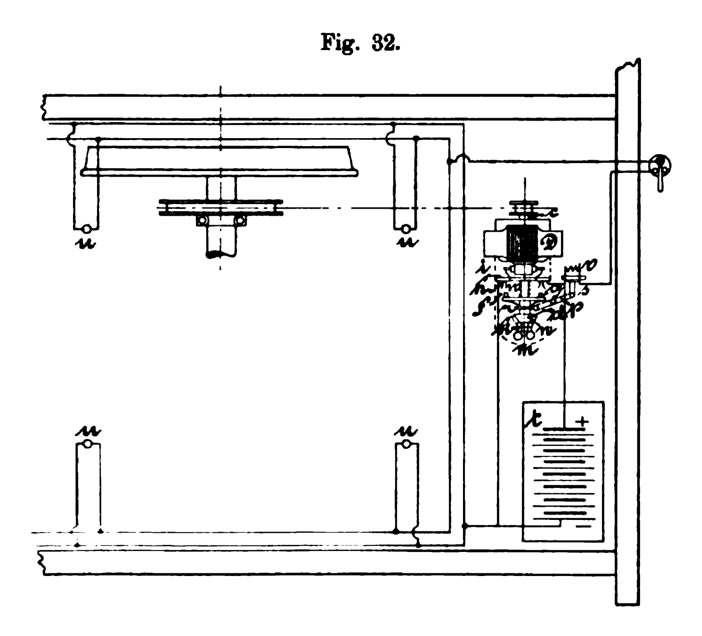
Das Einschalten der Akkumulatorenbatterien in den Stromkreis der Dynamomaschine, sobald letztere an den Klemmen die benötigte Spannung erreicht hat, wird durch einen mit der Achse der Dynamomaschine verbundenen Zentrifugalregulator bewerkstelligt, welcher im geeigneten Momente einen Umschalter bethätiget.

Zwecks Erzielung der stets gleichen Stromrichtung bei der Vor- und Rückwärtsbewegung des Zuges wird die Dynamomaschine mit der in den Fig. 32 bis 34 dargestellten Einrichtung versehen.

Auf die Welle c der Dynamomaschine (Fig. 33) ist die auf der linken Seite konisch erweiterte Hülse d lose aufgesetzt und wird dieselbe durch die Spiralfeder w nach links gedrückt. Auf diese Hülse ist eine zweite Hülse aufgeschoben, welche die beiden Flügel e, e und

die in die letzteren isoliert eingefügten Kontaktgeber f und g trägt. Diese Hülse wird infolge der Reibung von d in der Drehrichtung der Dynamoachse mitgenommen, da die beiden Hebel n n einer Art von Zentrifugalregulator, dessen Kopf k an der Dynamowelle c befestiget ist, infolge der Wirkung der Ringfeder l auf die beiden Gewichte m m, an die konische Fläche von d solange angedrückt werden, bis nicht bei gesteigerter Tourenzahl die Fliehkraft der beiden Gewichte m die Wirkung der Ringfeder aufhebt, in welchem Falle der Druck von n n verstärkt und d nach rechts verschoben wird.

Fig. 32.

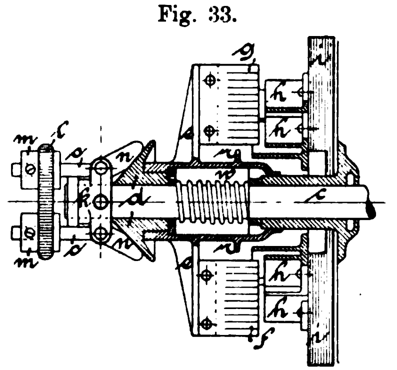


Diese Drehung der beiden Flügel und sohin auch der Kontaktgeber ist jedoch eine begrenzte, indem selbe durch einen Anschlag gehemmt werden und sich hiebei einem der beiden Sätze der ungleich hohen Kontaktklemmen h^1 bis h^5 gegenüberstellen (Fig. 34). Erhöht sich nun die Fliehkraft von m m, so wird, wie schon vornehin erwähnt, der Konus d nach rechts verschoben und die beiden Kontaktgeber werden zwischen die Klemmen h h hineingepresst und verbinden dieselben hiedurch leitend. Die Kontaktklemmen sind an der isolierenden Schaltscheibe i und diese wieder an dem Dynamomaschinengestelle befestiget.

Da die Dynamomaschine nicht bloss die Glühlampen zu speisen, sondern auch die Akkumulatoren zu laden hat, muss deren Spannung

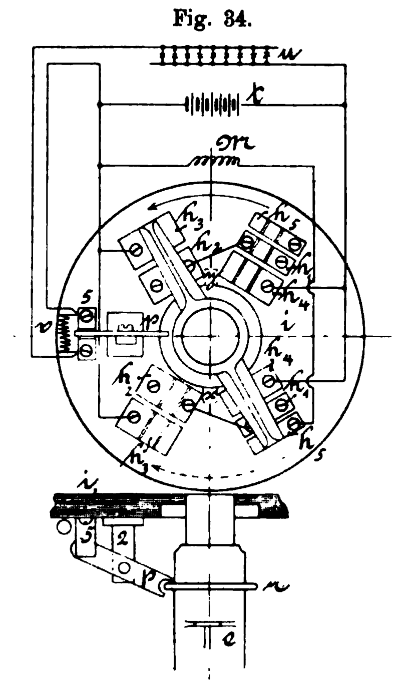
höher gehalten werden als die Betriebsspannung der Glühlampen. Will man daher diese Lampen bei normaler Spannung der Dynamomaschine von derselben speisen lassen, so muss denselben ein Widerstand vorgeschaltet werden, der wieder auszuschalten ist, wenn die Akkumulatoren allein die Lampen mit Strom versorgen.

Fig. 33.



Dieser in dem Stromkreis der Glühlampen und der Dynamomaschine liegende Vorschaltwiderstand v wird durch den Kontakthebel p, welcher in der auf der isolierten Scheibe i befestigten Stütze q drehbar gelagert ist, ein- oder ausgeschaltet. Im Ruhezustande der Dynamo ist dieser Hebel zwischen die beiden Kontaktbacken S eingeschoben und schliesst daher den Widerstand v kurz. Dieser Kontakthebel umgreift nun mit seiner Ausrundung den Rand des Konus von d (Fig. 34) und wird dadurch von selbem abhängig und muss der seitlichen Bewegung desselben folgen. Wird nun der Konus infolge der Fliehkraft des Zentrifugalregulators nach rechts getrieben, so nimmt er den Hebel p mit und hebt dadurch den zweiten Arm von p aus den Kontaktbacken S heraus und schaltet hiedurch den Vorschaltewiderstand v in den Lampenstromkreis ein.

Fig. 34.



Der sich im allgemeinen abspielende Vorgang ist nun folgender: Zu Beginn des Betriebes findet, solange die Dynamomaschine die erforderliche Tourenzahl nicht erreicht hat und sohin die Klemmenspannung derselben noch zu gering wäre, kein Stromschluss statt. Erreicht die Dynamomaschine eine gewisse Tourenzahl, so werden infolge der Fliehkraft von m m des Zentrifugalregulators die beiden Arme n n

desselben gegen die konische Abschrägung der Hülse d gedrückt und verschieben dieselbe, sohin auch die Flügel e e nach Ueberwindung des Widerstandes der Spiralfeder w, soweit nach links, dass die Kontaktgeber f und g mit je einem Satze der Klemmen h in leitende Verbindung treten. Der Strom fliesst dann zu Beginne, wie in Fig. 34 dargestellt, von der Bürste x der Dynamomaschine zur Klemme h_1, über den Kontaktgeber zu Klemme h_5, von derselben durch die Feldmagnetwickelung M zur Klemme h_8 über den zweiten Kontaktgeber zur Klemme h_2 und von dieser zur Bürste y zurück. Die Dynamomaschine ist in diesem Falle kurz geschlossen.

Erreicht die Dynamomaschine die zur Ladung der Akkumulatoren notwendige normale Geschwindigkeit bezw. Spannung, so verschiebt sich der Flügel e e noch weiter nach rechts und die beiden Kontaktgeber f und g stellen die Verbindung zwischen den Klemmen h_1 und h_4 her, was zur Folge hat, dass der Strom nunmehr auch nach der Akkumulatorenbatterie und den Lampen fliesst. Gleichzeitig hiemit wird aber auch der Hebel p von den Klemmen s abgehoben und hiedurch der Widerstand v in den Lampenstromkreis eingeschaltet. Der Strom teilt sich, wie aus Fig. 34 zu ersehen ist, bei h_1 und geht einesteils wie früher über h_5 zu der Feldmagnetwickelung M, anderenteils aber über h_4 durch die Lampen und die Akkumulatoren zu h_3.

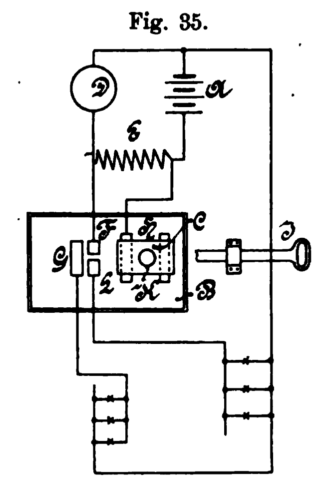
Bei Umkehrung der Drehrichtung des Motors verschiebt sich der Flügel e e in der bereits angedeuteten Weise, so dass die Kontaktgeber f und g mit dem zweiten Satze von Klemmen h in leitende Verbindung gelangen, wodurch, da deren Verbindungen entgegengesetzt angeordnet sind, der Strom die gleiche Richtung behalten muss.

Nachdem die Lampen bei Tage nicht brennen, die Akkumulatoren aber geladen werden sollen, muss für diesen Fall vor die Akkumulatoren ein Widerstand eingeschaltet werden, welcher, wenn die Lampen eingeschaltet sind, kurz geschlossen wird. Diese Umschaltung erfolgt durch einen vom Zugsbegleitungspersonale zu bedienenden Handumschalter und lässt sich dessen Wirkung aus dem Schaltungsschema Fig. 35 leicht erkennen. G, F, L und H bedeuten feststehende Kontakte, C eine mittels des Handgriffes J verschiebbare Kontaktplatte, welche durch eine hier nicht dargestellte kräftige Feder auf die festen Kontakte aufgedrückt wird.

Bei der in der Figur gezeichneten Lage von C geht der Strom der Dynamomaschine D über den Widerstand E zu den Akkumulatoren A und von da zu D zurück. Die Batterien werden allein geladen. Ist die Platte C jedoch so verschoben, dass sie die Klemmen G, F, L

und H gleichzeitig deckt, so fliesst der Strom auch durch die Lampenstromkreise und ladet, da der Widerstand E kurz geschlossen ist, gleichzeitig die Akkumulatorenbatterie. Bei noch weiterer Verschiebung von C nach links werden nur G, F, L miteinander verbunden bleiben und die Dynamomaschine wirkt fast ausschliesslich auf die Lampenstromkreise, da nur ein geringer Bruchteil des Stromes über den Widerstand E durch die Akkumulatorenbatterie hindurch geht.

Fig. 35.



Dieses System der elektrischen Zugsbeleuchtung findet in England, Amerika, Japan und Australien in ziemlich bedeutendem Umfange Anwendung, soll sich jedoch auf den russischen Bahnen, auf welchen ca. 100 solcher Wagen im probeweisen Betriebe standen, nicht bewährt haben.

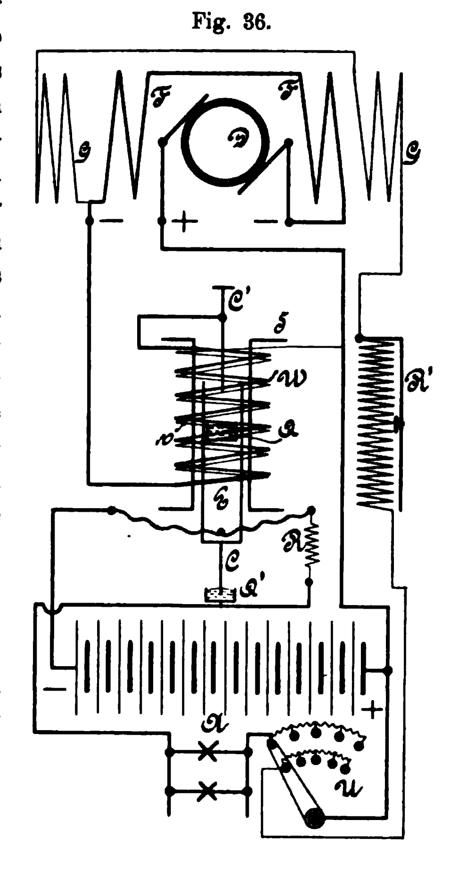
Das Beleuchtungssystem Vicarino. Vicarino verwendet zur Erzielung der stets gleichen Spannung der Dynamoströme bei wechselnder Zugs- und Tourengeschwindigkeit eine Dynamomaschine, deren Feldmagnete umgekehrt compound gewickelt sind. Und zwar dient eine dünne Nebenschlusswickelung zur Erregung, während die zweite dicke und entgegengesetzt gewickelte Spule vom Hauptstrome durchflossen wird. Das gegenseitige Verhältnis beider Wickelungen ist hierbei so bemessen, dass die erzeugte Spannung bei jeder Geschwindigkeit nahezu die gleiche ist.

Sobald nach Beginn der Fahrt die Geschwindigkeit der Dynamo gross genug ist, um die Spannung der Batterie zu erreichen, verbindet der automatische Umschalter die Dynamo mit dem äusseren Stromkreis und selbe speist sodann die Lampen parallel mit der Batterie. Bei weiterer Erhöhung der Geschwindigkeit wird die Spannung soweit vergrössert, dass die Batterien von der Dynamomaschine geladen und nebstbei auch die Speisung der Lampen vom Batteriestrom allein besorgt wird. Da jedoch der gesamte Strom nun auch die dicke Wickelung der Feldmagnete durchfliesst, werden dieselben teilweise entmagnetisiert und sinkt die Spannung auf den ursprünglichen Wert herab. Damit nun die Batterie eine gewisse Ladung aufnehmen kann, ohne dass eine Erhöhung der Stromstärke in den Lampen eintritt, wird für den Fall der gleichzeitigen Speisung der Lampen durch den Maschinenstrom in den Lampenstromkreis ein kleiner Vorschaltwiderstand eingefügt.

Die Aufgabe des automatischen Umschalters ist hierdurch festgesetzt. Er hat nämlich die Verbindung zwischen dem äusseren Stromkreise und der Dynamomaschine rechtzeitig zu schliessen und zu öffnen und zugleich den Vorschaltwiderstand für die Lampen einzuschalten bezw. kurz zu schliessen.

Der automatische Umschalter besteht, wie aus der schematischen Darstellung der ganzen Anordnung (Fig. 36) zu ersehen, aus einem Solenoide S mit doppelter Wickelung v-W und einem innerhalb desselben nach auf- und abwärts beweglichem Eisenkern E, in dem ein mit Quecksilber gefülltes Näpfchen Q eingesetzt ist und der unten einen Kontaktstift C trägt, welcher in der gezeichneten Lage in ein gleichfalls mit Quecksilber gefülltes Näpfchen Q^1 eintaucht, und so den Widerstand R, welcher die Verbindung mit dem Lampenstromkreise herstellt, kurz schliesst. Die dünne Wickelung v dieses Solenoides liegt nun an den Klemmen der Dynamomaschine, die dicke Wickelung hingegen im Hauptstromkreise.

Fig. 36.



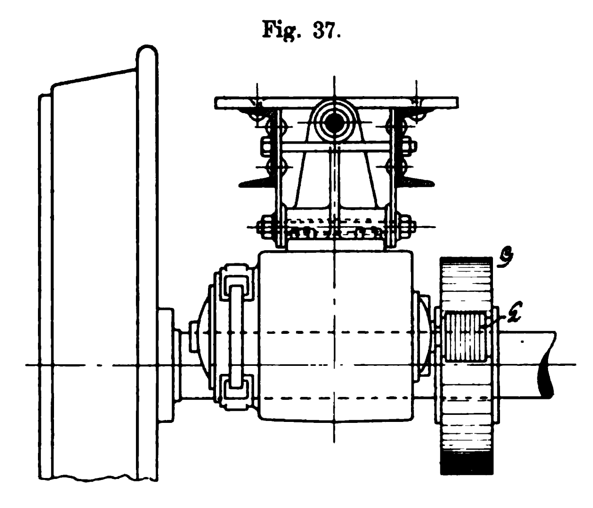
Die dünne Wickelung ist hiebei so bemessen, dass der Kern E der Spule in die Höhe gezogen wird, sobald die Spannung der Maschine um ein geringes Mass höher geworden ist als die Spannung der Batterie. Sobald nun der Kern soweit in die Höhe gezogen ist, dass der Stift C′ in das Näpfchen Q eintaucht und so die Verbindung der dicken Wickelung mit dem Hauptstromkreis herstellt, zieht sich der Stift C aus dem Näpfchen Q′ und der die Lampen durchfliessende Strom muss vorher durch den Widerstand R hindurchgehen, wodurch dessen Spannung herabgedrückt wird. Die dicke Wickelung unterstützt hierbei die dünne Wickelung. Sinkt die Maschinenspannung wieder unter das Normale, so senkt sich der Kern infolge der Schwere

nach abwärts und unterbricht die Verbindung mit dem Hauptstromkreise. Gleichzeitig mit dem Einschalten des Hauptstromkreises wird auch die Gegenwindung der Magneterregnng eingeschaltet, wodurch die Spannung der Dynamomaschine stets auf der gleichen Höhe erhalten werden soll.

In dem Schema Fig. 36 bedeuten ausserdem D die Dynamomaschine, F die Feldmagnetwickelung, G die Gegenwindungen derselben, A die Akkumulatorenbatterie, U einen Umschalter zum Einschalten des Lampenstromkreises und R^1 einen Rheostaten zur Regulierung der Stromintensität in den Gegenwindungen G.

Um den Strom auch bei entgegengesetzter Fahrt, also bei umgekehrter Drehrichtung des Dynamoankers gleich verlaufend zu er-

Fig. 37.

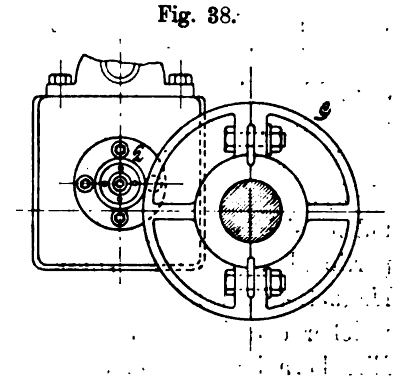


halten, werden die Bürsten der Dynamo bei Wechsel der Fahrtrichtung selbstthätig um 180° verschoben. Zu diesem Zwecke sitzen die Bürstenhalter isoliert auf einer Scheibe, die durch ihre eigene Reibung auf der Ankerwelle und die Reibung der Bürsten auf dem Kollektor im Sinne der Ankerdrehung mitgenommen wird, bis sie mit einer ihrer Nasen an einen Anschlag anstösst, die die Weiterbewegung verhindert.

Der Ausschalter U dient dazu, die Dynamomaschine nur solange eingeschaltet zu lassen, als die Lampen brennen, indem durch Abstellen desselben die schwach gezeichnete Erregerwickelung der Maschine ebenfalls unterbrochen wird. Dieser Ausschalter kann, wie angedeutet, durch Ein- und Ausschaltung von Widerständen zur beliebigen Verdunkelung und Erhellung der Lampen mit verwendet werden.

Die Anordnung der Dynamomaschine am Untergestelle eines Eisenbahnwagens zeigt Fig. 37 u. 38. Die Uebertragung der Bewegung von der Wagenachse erfolgt durch eine auf dieselbe aufgesetzte Gussscheibe G und eine auf die Dynamomaschinenwelle befestigte Lederscheibe L, welche teilweise durch das Gewicht der drehbar aufgehängten Dynamo, teilweise durch den Druck einer Feder aneinander gepresst werden. Das Verhältnis beider Durchmesser ist hiebei so gewählt, dass die Dynamomaschine bei mittlerer Zugsgeschwindigkeit ungefähr 1200 Umdrehungen pro Minute macht.

Fig. 38.



Wie praktisch durchgeführte Untersuchungen zeigten, war die Stromstärke zwischen 60 bis 100 km Zugsgeschwindigkeit nahezu konstant. Bei ca. 44 km trat der automatische Umschalter bereits in Wirkung und überschritt die Stromstärke bei 60 km den Verbrauch in den Lampen, so dass von da ab die Akkumulatoren mitgeladen wurden.

Dieses System der Zugsbeleuchtung fand auf der französischen Westbahn und auf den bayerischen Staatsbahnen versuchsweise Anwendung und soll auch in neuerer Zeit die Jura—Simplon einige mit diesem Beleuchtungssystem eingerichtete Wagen in den Betrieb eingestellt haben.

Das System Emil Dyck. Bei diesem Systeme, welches ursprünglich für die Beleuchtung ganzer Züge in dem Sinne angewendet wurde, dass nur ein Wagen des Zuges mit einer Dynamomaschine und den zugehörigen Schalteapparaten ausgerüstet wurde, während jeder Wagen die für seinen Bedarf nötigen Akkumulatorenbatterien mit sich führte, ist in neuerer Zeit auch auf die Einzelwagenbeleuchtung, nach welcher jeder Wagen komplett ausgerüstet wird, erweitert worden. Der Unterschied zwischen diesen beiden Abarten der Beleuchtung besteht einfach nur darinnen, dass im ersteren Falle die Dynamomaschine so gross gehalten werden muss, dass sie den längsten Zug mit elektrischer Energie zu versorgen vermag, und dass durch den ganzen Zug drei Leitungen, die selbstverständlich von Wagen zu Wagen gekuppelt werden, verlaufen, von welchen aus die Speisung der Lampen und die Ladung der Akkumulatorenbatterien, die parallel geschaltet sind, erfolgt.

Da hier nur das Prinzip der Einrichtung erläutert werden soll, kann auf die Vorführung der kleinen Detailunterschiede, welche diese beiden Varianten aufweisen, verzichtet werden.

Die Dynamomaschine, welche nach aussen hin vollständig durch ein Schutzgehäuse abgeschlossen ist, wird an der Unterseite des Wagens, ähnlich wie ein Strassenbahnwagenmotor, aufgehängt und durch ein Zahnradgetriebe mit der Wagenachse gekuppelt. Die Dynamomaschine, welche auch in der äusseren Form mit einem derartigen Motor identisch ist, besitzt jedoch keine Selbsterregung, sondern wird durch den Strom der Akkumulatorenbatterien erregt. Der Erregerstrom wird nun nach Massgabe der Steigerung der Tourenzahl des Ankers, durch Einschalten von Widerständen in den Erregerstromkreis abgeschwächt und hiedurch die Spannung für alle Tourenzahlen praktisch nahezu gleich erhalten, indem sich bei steigender Zugsgeschwindigkeit das Magnetfeld proportional schwächt. Diese Abschwächung bezw. Verstärkung des Magnetfeldes erfolgt durch einen automatischen Regulator P (Fig. 41), welcher dem Wesen nach aus einem, in einem Solenoide beweglichen Eisenkern besteht und entsprechend den auf denselben einwirkenden Ampèrewindungen in verschiedenen Lagen erhalten wird. Dieser Kern taucht mit seiner Verlängerung nach unten in ein Kontaktgefäss ein, welches aus einem mit vier Fenstern versehenen metallischen Gehäuse besteht, in welchem konzentrisch zur Bohrung Kontaktscheiben durch Fiber isoliert angeordnet sind. Jede der aus Eisenblech bestehenden Kontaktscheiben ist mit ihrer aus einem der Fenster hervortretenden Ableitungszunge gegen die vorhergehende um 90° versetzt, so dass jedes vierte Kontaktblech aus demselben Fenster hervorragt. Von den Ableitungszungen gehen Ableitungskabel zu den entsprechenden Punkten des Regulierwiderstandes R. Der untere Teil des Kontaktgefässes wird mit Quecksilber gefüllt. Der Eisenkern des Solenoides taucht nun bei stromloser Spule bis zu unterst in das Kontaktgefäss O ein, verdrängt das Quecksilber, welches nun alle Kontaktscheiben kurz schliesst. Wird der Eisenkern bei Stromschluss in das Solenoid hineingezogen, so sinkt das Quecksilber nach abwärts und schaltet allmählich Widerstand in den Erregerstromkreis der Dynamo.

Das Solenoid hat nun zwei Wickelungen und zwar eine innere, aus vielen Windungen dünnen Drahtes, und eine äussere, aus wenig Windungen dicken Drahtes bestehende. Die innere Wickelung ist im Nebenschlusse zur Akkumulatorenbatterie, die äussere in den Dynamostromkreis eingeschaltet und wirken beide sich gegenseitig unterstützend. Sobald der Dynamostrom eine gewisse Grenze überschreitet, wirkt die

äussere Windung verstärkend auf die Anziehung der inneren Windung, der Kern wird hochgezogen und hiedurch ein bestimmter Widerstand in den Erregerstromkreis eingeschaltet, wodurch sich die Erregung der Dynamo abschwächt und die Spannung derselben stets gleich erhalten wird.

Um sowohl die Gleichrichtung des Stromes der Dynamomaschine bei wechselnder Fahrtrichtung als das selbstthätige Zu- und Abschalten der Dynamomaschine an die Batterien bezw. Glühlampen zu bewirken und andererseits wieder einen in den Lampenstromkreis eingeschalteten Widerstand nach Bedarf kurz zu schliessen oder diesen Kurzschluss aufzuheben, dient der in Fig. 39 und 40 dargestellte Schalteapparat. Derselbe besteht aus einem auf einer Grundplatte befestigten, aus fünf Wickelungen gebildeten Solenoide. Oberhalb des Solenoides ist ein doppelarmiger Hebel drehbar gelagert und mit dessen Enden je eine Zugstange gelenkig verbunden. Die linke Zugstange trägt den in das Solenoid hineinragenden Eisenkern, dessen auf- und abwärts gehende Bewegung durch Arretiermuttern begrenzt ist. Die rechtsseitige Zugstange trägt einen rechteckigen Rahmen, in welchem eine Walze gelagert ist, und ein zur genauen Ausbalancierung des ganzen Gestänges dienendes Gegengewicht.

Unterhalb des Solenoides und Gestänges befinden sich sechs auf einem Winkel isoliert aufsitzenden Quecksilbernäpfchen und die aus ebensovielen, an Traversen der rechten und linken Zugstange isoliert befestigten Kontaktstiften bestehende Kontaktvorrichtung. Die Ableitung von den Kontaktstiften erfolgt mittels flexibler Kupferkabel. Die Kontaktnäpfe sind durch eingeschraubte Deckel aus Isoliermaterial abgeschlossen, und dienen in denselben vorgesehene Bohrungen zur zentrischen Führung der Kontaktstifte. Die Kontaktnäpfe sind ausserdem mit Isolierröhren ausgekleidet, um das Entstehen von Flammenbogen zwischen den Wandungen der Kontaktgefässe und den Kontaktstiften hintanzuhalten. Zur Verhinderung des Schleuderns des Quecksilbers ist in das Kontaktgefäss ausserdem ein trichterförmiger Zwischenboden eingesetzt.

In der Ruhelage steht der doppelarmige Hebel horizontal, was durch den rechteckigen Rahmen mit darin gelagerter Walze bedingt wird, indem auf letztere zwei einarmige, mit Spiralfeder versehene Hebel in entgegengesetzter Richtung pressen, deren Weg durch eine zwischen denselben befindliche Anschlagsäule begrenzt ist.

Wird nun die Zugstange nach auf- oder abwärts bewegt, so tritt der eine oder der andere der federnden Arme in Wirkung und sucht den Eisenkern in seine Mittellage zurückzuführen, in welcher Lage er auch verbleibt, wenn keine äusseren Kräfte auf denselben wirken.

Die in Fig. 39 mit einfacher Schraffierung dargestellten Wickelungen sind aus dünnerem isolierten Kupferdraht hergestellt, während

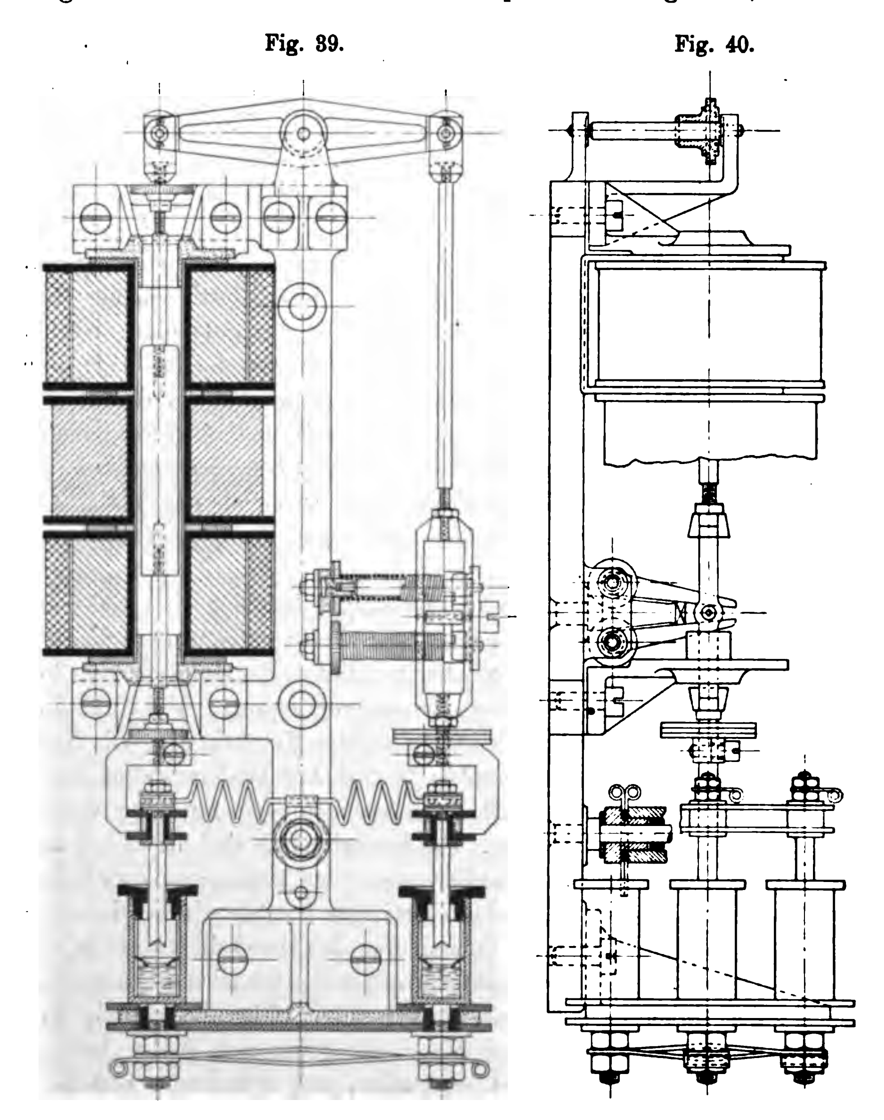


Fig. 39. Fig. 40.

die durch gekreuzte Striche hervorgehobenen dicken Wickelungen den Hauptstrom leiten.

Die beiden Hauptstromspulen sind, ebenso wie die unter denselben befindlichen Zuschaltespulen, in Serie so geschaltet, dass die Stromrichtung in beiden einander entgegengesetzt ist. Die in der Sole-

noidmitte gelegene Wickelung ist in Serie mit einem Widerstand und einer Relaiswickelung geschaltet und führen deren Enden direkt zu den Batterien, wodurch selbe den Eisenkern polarisieren.

Die Zuschaltespulen sind, wie aus dem Schema Fig. 41 ersichtlich, unter Zwischenschaltung eines Widerstandes und einer Relaisspule direkt an die Dynamobürsten angeschlossen. Setzt sich ein Zug in Bewegung und entsendet sohin die Dynamo durch diese Windungen Strom, so wird eine der beiden Zuschaltespulen die Wirkung der mittleren, mit der Batterie in Verbindung stehenden Solenoidspulen unterstützen, wodurch der Kern des Solenoides je nach der Fahrtrichtung entweder nach auf- oder abwärts gezogen wird, so dass hiedurch entweder die rechten oder die linken drei Kontaktstifte in die zugehörigen Kontaktnäpfe hineingeschoben werden. Die Abmessungen der Spulen sind hiebei so geordnet, dass eine leitende Verbindung zwischen den Kontaktstiften und dem in den Kontaktnäpfchen befindlichen Quecksilber erst dann eintritt, wenn die Spannung der Dynamo jene Höhe erreicht hat, dass sie an die Lampen und Batterien angeschaltet werden kann. In dem Momente jedoch, wo diese Anschaltung erfolgt, durchfliesst auch der Hauptstrom die dicken Wickelungen, wodurch die Anziehungskraft des Solenoides entsprechend der Stärke dieses Stromes vergrössert wird, was ein vollständiges Eintauchen der Kontaktstifte in die zugehörigen Näpfe verursacht.

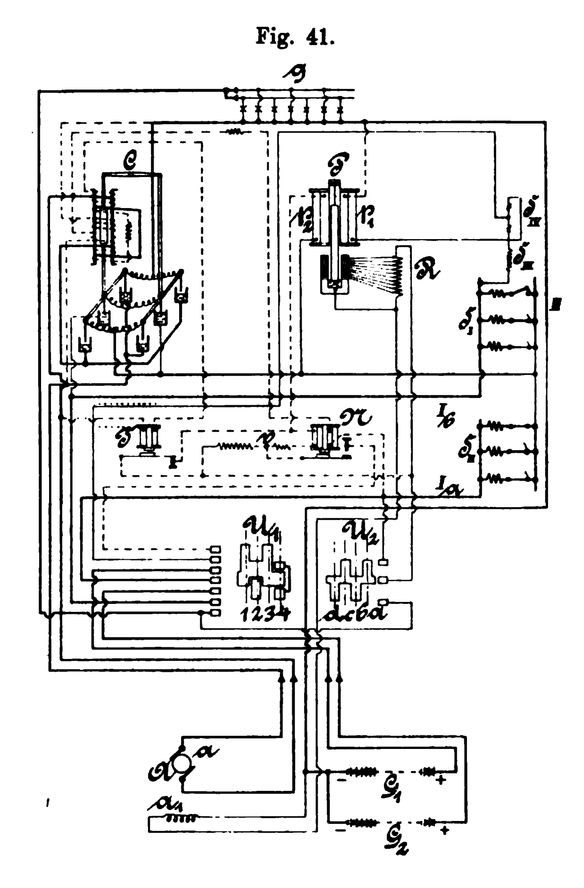
Bei entgegengesetzter Drehrichtung des Dynamoankers durchfliesst der Strom die Haupt- und Ergänzungsspulen des Solenoides in entgegengesetzter Richtung, wodurch sich auch die entgegengesetzten Verbindungen zwischen den Kontaktstiften und Näpfchen herstellt. Die Stromrichtung zu den Lampen und Batterien muss aber immer die gleiche bleiben, weil die vier äusseren Kontaktnäpfe kreuzweise miteinander verbunden sind.

In der Ruhe- bezw. Horizontallage des Armes sind die vier äusseren Kontaktnäpfe ausser Verbindung mit den zugehörigen Kontaktstiften, hingegen sind die beiden mittleren Kontaktnäpfe, in welche mehr Quecksilber eingefüllt ist, in dieser Lage leitend miteinander verbunden und schliessen den Widerstand S_1 kurz. Bei der Einschaltestellung wird dieser Widerstand wieder eingeschaltet.

Das Relais N (Fig. 41) erfüllt die Aufgabe, die Klemmenspannung der Dynamomaschine nach beendigter Ladung der Akkumulatorenbatterien indirekt durch den Regulator P so weit herabzudrücken, dass eine weitere Ladung der Batterie nicht stattfindet. Dasselbe besteht aus einem Elektromagneten mit doppelter Wickelung und einem Anker.

Normal wird bloss die innere Wickelung desselben vom Strome durchflossen. Sobald die Klemmenspannung der Maschine sich während der Ladung auf 2,5 bis 2,6 Volt pro Zelle erhöht, wird durch die Wirkung dieser Wickelung der Anker angezogen und hiedurch ein Kontakt hergestellt, über welchen nun auch die äussere Wickelung Strom empfängt,

Fig. 41.



deren Widerstand eine Verminderung des Erregerstromes für die Dynamo bedingt.

Dem Relais T fällt die Aufgabe zu, durch Einschalten von Widerständen den Stromverlust im Erregerstromkreise bei Stillstand des Zuges herabzudrücken. Der von den Bürsten der Dynamo abgehende Strom hält den Anker desselben normal angezogen. Sobald dieser Strom aufhört oder zu schwach wird, hebt sich der Anker von demselben ab und unterbricht den Kontakt, wodurch eben die Einschaltung der Widerstände erfolgt.

Die Umschalter U_1 und U_2 (Fig. 41) haben den Zweck, durch geeignete Einstellung derselben die beiden Akkumulatorenbatterien bei ausgeschalteten Glühlampen parallel zu schalten, damit die Ladung derselben gleichzeitig erfolgt, und andererseits bei eingeschalteten Glühlampen eine der Batterien auf Ladung zu bringen. Die andere Batterie dient zur Ausregulierung der Glühlampenspannung. Jede zweite Nacht abwechselnd, wird eine dieser Batterien geladen.

Der Umschalter ist nach Art der Trambahnkontroller mit zwei Walzen ausgerüstet, deren entsprechend ausgestaltete Kontaktsegmente durch Anlegen an die Kontaktfedern die gewünschte Leitungsverbindung herstellen. In der Figur sind die beiden Walzen als in einer Ebene aufgerollt dargestellt.

Jeder Wagen ist mit zwei Batterien zu 18 Elementen ausgerüstet, deren Kapazität nach der Anzahl und Stärke der Lampen und nach der Anzahl der geforderten Brennstunden bestimmt wird. Dieselben werden gewöhnlich so bemessen, dass sie die gesamte Beleuchtung ohne Mitwirkung der Dynamo durch 6 Stunden aufrecht zu erhalten vermögen.

Um das Zusammenwirken der einzelnen Teile zu verfolgen, sei die schematische Anordnung (Fig. 41) verfolgt. In derselben bezeichnet:

A die Dynamomaschine,
a den Anker derselben,
a_1 die Magnetwickelung,
C den automatischen Schalteapparat,
P den automatischen Regulator,
N das Relais zur Verhinderung der Ueberladung,
T das Relais zur Verminderung des Stromverlustes im Erregerstromkreis,
U_1 U_2 die Umschalter,
S_{II} den Ladewiderstand,
S_I den Lichtwiderstand,
G_1 G_2 die Akkumulatorenbatterien,
g die Glühlampen.

Sind die Glühlampen ausgeschaltet und der Umschalter U_2 auf Fahrt gestellt, so sind durch den Schalter U_1 die fünf oberen, durch den Schalter U_2 die zwei oberen Kontaktlamellen in leitende Verbindung gebracht.

Verfolgt man nun den Stromverlauf in den stark gezogenen Hauptleitungen, so zeigt sich, dass die beiden Batterien parallel geschaltet sind.

Steht der Zug stille, so zirkuliert von den Batterien aus ein schwacher Strom durch die mittlere Wickelung des automatischen Schalteapparates C über einen Widerstand durch die innere Wickelung des Relais N zum positiven Pole der Batterien zurück, wodurch der Eisenkern des Schalteapparates polarisiert wird. Ein zweiter schwacher Strom geht gleichzeitig vom negativen Pole der Batterien durch die innere Wickelung des Dynamoregulators P über die Kontaktvorrichtung des Relais T und den Schalter U_2 zum positiven Pole der Batterien. Hiedurch wird die innere Wickelung des Regulators der vollen Batteriespannung ausgesetzt und zieht selbe den Eisenkern ganz in die Höhe, so dass der ganze Regulierwiderstand in den Erregerstromkreis der Dynamo eingeschaltet ist.

Ein dritter schwacher Teilstrom fliesst vom negativen Pole der Batterien durch die Magnetwickelung a_1 der Dynamo, durch den Regulierwiderstand R über den Schalter U_2 zum positiven Pole derselben zurück.

Hiedurch bleibt die Dynamo auch während des Stillstandes des Zuges schwach erregt und wird daher beim Anfahren des Zuges von der Dynamo eine der Stärke des Feldes und der momentanen Tourenzahl des Ankers entsprechende Spannung erzeugt. Nun sind an die von den Bürsten der Dynamo abgehenden Hauptleitungen die beiden Zuschaltespulen des Schalteapparates C, ferner unter Zuschaltung eines grossen Widerstandes auch die Wickelung des Relais T angeschlossen. Da aber ein durch diesen Kreis gehender, äusserst schwacher Strom genügt, um den Anker des Relais T anzuziehen, wird nun der durch den Regulator P der inneren Wickelung hindurchgehende Teilstrom gezwungen, auch durch die äussere Wickelung des Relais N, über den Widerstand v zum positiven Pol der Batterie zurückzukehren. Die Anziehungskraft des Solenoides schwächt sich und der Eisenkern senkt sich in das Kontaktgefäss hinein und schliesst den Regulierwiderstand R kurz, wodurch der Erregerstrom verstärkt und dementsprechend die Spannung der Dynamo erhöht wird. Dieselbe erhält bei einer Zugsgeschwindigkeit von ca. 20 km in der Stunde eine Spannung, welche diejenige der Batterien um ein weniges übertrifft.

Sobald die Dynamo diese Klemmenspannung erreicht hat, ist der von den Bürsten über die Zuschaltespulen des Schalteapparates, den Widerstand und die Wickelung des Relais T fliessende Teilstrom hinreichend stark geworden, um den Schalteapparat in Wirksamkeit zu bringen, wodurch sich die Dynamomaschine an die Batterieleitung anschaltet.

Erhöht sich nun die Zugsgeschwindigkeit, so erhöht sich auch die an die Batterien abgegebene Stromstärke bis zu einem bestimmten maximalen Werte. Da der Ladestrom nun die Hauptstromwickelung des selbstthätigen Schalteapparates C durchfliesst, unterstützt selbe die Wirkung der Zusatzwickelung, wodurch ein vollständiges Eintauchen der Kontaktstifte in die zugehörigen Quecksilbernäpfe stattfindet.

Dieser Hauptstrom verzweigt sich, nachdem er die dicken Wickelungen durchlaufen hat, in drei Zweige, deren einer aus dem Ladewiderstande S_{II}, der zweite aus dem Lampenwiderstande S_I und einem in Serie geschalteten Widerstande S_{III}, und der dritte aus der äusseren Wickelung p_1 des Regulators gebildet wird, wobei von den letzteren beiden Teilströmen der Widerstand S_{IV} gemeinsam durchflossen wird. Die Grösse der einzelnen Widerstände ist genau bemessen und mit Ausnahme der Widerstände S_I und S_{II}, die der Anzahl und Stärke der Glühlampen, sowie der Grösse der Batterie entsprechend eingestellt werden können, unveränderlich.

Verfolgt man nun den sich abspielenden Vorgang, so zeigt sich, dass die Dynamomaschine unter allen Umständen erregt ist, und wie dies bereits nachgewiesen, die Einschaltung derselben in den Ladestromkreis erst dann erfolgt, wenn die Klemmenspannung der Dynamo bereits die erforderliche Grösse erreicht hat. Steigert sich nun die Zugsgeschwindigkeit und hiemit auch die Tourenzahl des Ankers, so steigert sich auch die Spannung in der Dynamomaschine bis zu einer bestimmten Grenze, dann tritt aber sofort der selbstthätige Regulator P durch den denselben durchfliessenden Zweigstrom in Wirksamkeit und schaltet Widerstände in die Erregerleitung, so dass die Erregung nach Massgabe der Zunahme der Zugsgeschwindigkeit abnimmt und hiedurch die Spannung der Dynamo für jede Zugsgeschwindigkeit konstant bleibt. Der Regulator arbeitet in diesem Falle auf eine konstante Stromstärke, welche zum Laden der Batterien aufrecht erhalten bleiben muss, während sich die Ladespannung entsprechend der stetig zunehmenden Gegenspannung der Batterie nach und nach erhöhen muss.

Sind die Batterien voll aufgeladen und haben selbe daher die maximale Spannung erreicht, so tritt, um ein Ueberladen derselben hintanzuhalten, das Relais N in Wirkung, indem dessen Anker angezogen und durch leitende Verbindung der Kontaktfeder mit dem zugehörigen Kontakte ein Teil des Widerstandes v kurz geschlossen wird, wodurch sich der Widerstand des durch die innere Wickelung des Regulators P verlaufenden Nebenschlussstromkreises wesentlich verringert und sich infolgedessen, da der Kern des Regulators hoch-

gezogen wird, in den Erregerstromkreis mehr Widerstand einschaltet und hiedurch die Spannung der Dynamo herabdrückt.

Der Regulator wirkt nun als Spannungsregulator und hält die Klemmenspannung der Dynamo in den Grenzen von 40 bis 43 Volt, innerhalb welcher eine Weiterladung der Batterien ausgeschlossen ist und ein Abschalten der Dynamo nicht stattfinden kann.

Die zweite äussere Wickelung des Relais N, welche durch das Anziehen des Ankers eingeschaltet wurde, unterstützt nun die Wirkung der inneren Wickelung und verhindert trotz der nunmehr reduzierten Spannung ein Abspringen des Ankers vom Kontakte.

Verringert sich vor Anhalten eines Zuges die Umdrehungszahl des Dynamoankers so weit, dass die Spannung der Dynamo unter 43 Volt herabsinkt, so tritt der automatische Einschalter in Wirkung und schaltet die Dynamomaschine von den Leitungen ab. Sinkt die Geschwindigkeit des Zuges noch weiter, so schnellt endlich auch der Anker des Relais T zurück und schliesst die äussere Wickelung des Relais N nebst dem Widerstande v kurz. Hiedurch hebt sich auch der Anker des Relais N ab und der Akkumulatorenstrom geht mit seiner vollen Spannung in den Regulator P, dessen Kern hoch gezogen wird und den gesamten Widerstand in den Erregerstromkreis schaltet.

Sind die Umschalter U_1 U_2 so gestellt, dass die Glühlampen eingeschaltet sind, so sind die fünf unteren Klemmen von U_1 verbunden, hingegen ist die Verbindung des Widerstandes von S_{IV} mit der Hauptleitung Ia und der zum Kontaktstifte des Relais N führenden Leitung unterbrochen.

Bei stillstehenden Wagen decken dann die beiden Batterien gemeinschaftlich den Strombedarf der Lampen, weil die Batterien unter Zwischenschaltung des geringen Widerstandes S_{II} untereinander durch die mittleren Kontaktnäpfe und Stifte des selbstthätigen Umschalters verbunden sind. Bei Zugsbewegung wiederholen sich die vorher bereits beschriebenen Vorgänge in ähnlicher Weise, und kann auf deren Detailvorführung um so mehr Verzicht geleistet werden, als sich dieselben bei eingehender Verfolgung des allerdings schwer verständlichen Schemas aufrollen lassen werden.

Dieses System der elektrischen Zugsbeleuchtung, ursprünglich für ganze Züge angewendet, wurde, da die Leitungsverbindungen zwischen den einzelnen Wagen, die, um das Rangieren der Wagen zu ermöglichen, lösbar sein müssen, und dies zu steten Anständen Veranlassung gibt, erst in neuerer Zeit auch auf die beschriebene Einzelwagenbeleuchtung ausgedehnt.

Im grundsätzlichen wurde an der Gesamteinrichtung jedoch nur wenig geändert, und war nur das Bestreben dahin gerichtet, das Gewicht der Gesamteinrichtung so tief als möglich herabzudrücken und dabei die Wirksamkeit der Einzelapparate auf das sicherste zu gestalten.

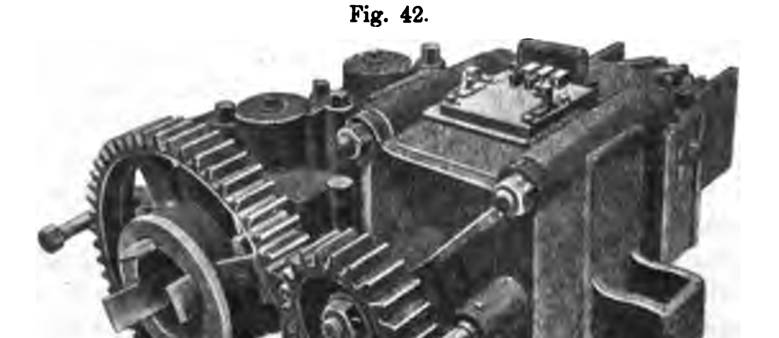
Dass dies dem Konstrukteur vorzüglich gelungen ist, beweist der Zug der k. k. österreichischen Staatsbahnen, welcher auf der Linie Wien—St. Pölten durch mehr als ein Jahr verkehrte, ohne dass die Beleuchtung jemals versagte, sowie die in den Schnellzügen der Aussig—Teplitzer und der Buschtehrader Bahn eingestellten Wagen für die Einzelbeleuchtung, welche während des Sommerbetriebes 1900 keinen Anlass zu Störungen gaben.

Das Columbian-System für die elektrische Beleuchtung und Ventilation der Eisenbahnwagen. Bei diesem von Kennedy ersonnenen Systeme der Einzelwagenbeleuchtung wird gleich wie bei dem vorhergehenden Systeme der Elektrogenerator durch Zahnradgetriebe direkt von der Wagenachse angetrieben und zeigt Fig. 42 die äussere Form der Dynamo nebst Antrieb. Die Gleichrichtung des von der Maschine entsendeten Stromes erfolgt durch einen Doppelhebelumschalter auf rein mechanischem Wege, indem dieser Umschalter durch ein Schneckengetriebe, in welches ein Zapfen eingreift, in die richtige Lage gebracht wird. Dieses Schneckengetriebe ist direkt in die Dynamoachse eingeschnitten und, wie aus Fig. 43 zu ersehen, so eingerichtet, dass die freie Bewegung dieser Achse in keiner Weise gehemmt wird.

Der Generator, welcher als Nebenschlussmaschine gebaut ist, wird hier gleichfalls von der Akkumulatorenbatterie aus erregt, wobei der Erregerstrom, entsprechend der Umdrehungszahl des Ankers, durch einen Rheostaten, welcher Widerstand in den Erregerstromkreis einoder ausschaltet, reguliert und so die Spannung gleichhält. Dieser Rheostat wird gleichfalls selbstwirkend durch einen Sperrkegelmechanismus bethätigt und werden die Sperrkegel durch einen kleinen Motor in vibrierender Bewegung erhalten, wobei der eine oder der andere Sperrkegel in ein Gesperre eingreift, welches durch die Wirkung eines in den Armaturstromkreis eingeschalteten Elektromagneten den Rheostatarm entsprechend der Tourenzahl verschiebt. Mit dieser Reguliervorrichtung ist, von demselben Elektromagneten bethätigt, eine andere Vorrichtung in Verbindung gebracht, welche in den Lampenstromkreis einen Widerstand schaltet, sobald die Akkumulatoren von der Dynamomaschine geladen werden, um so die Erhöhung der Spannung in der Batterie auszugleichen. Desgleichen ist weiters ein auto-

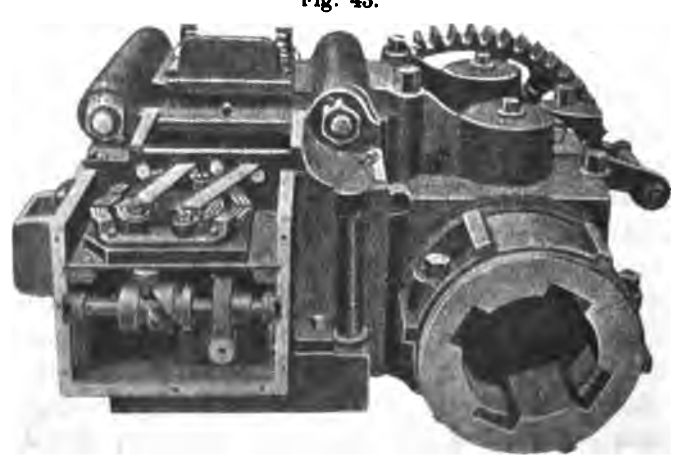
matischer Ausschalter vorgesehen, welcher die Verbindung zwischen der Batterie und der Dynamomaschine aufhebt, wenn der betreffende Wagen stillsteht oder dessen Geschwindigkeit unter eine bestimmte Grenze herabsinkt.

Fig. 42.



Das Zusammenwirken der einzelnen Teile erklärt sich nun folgendermassen. Sobald der Zug stillsteht oder sich mit unternormaler Geschwindigkeit bewegt, ist die Verbindung zwischen Dynamo-

Fig. 43.



maschine und Akkumulatoren durch den selbstthätigen Ausschalter unterbrochen und die Beleuchtung wird von den Akkumulatoren allein besorgt, wobei auch der Vorschaltewiderstand ausgeschaltet ist. Sobald sich nun die Geschwindigkeit des Zuges so weit erhöht, dass die Span-

nung der Maschine die normale Stärke erreicht hat, schliesst der automatische Ausschalter die Verbindung zwischen der Dynamomaschine und den Batterien, wobei der Strom durch den Elektromagneten oder das Solenoid hindurchgeht und dessen Armatur angezogen wird. Hiedurch wird auch die Verbindung mit dem Sperrkegelmechanismus hergestellt, welcher nunmehr den Rheostatarm in eine solche Bewegung

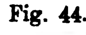
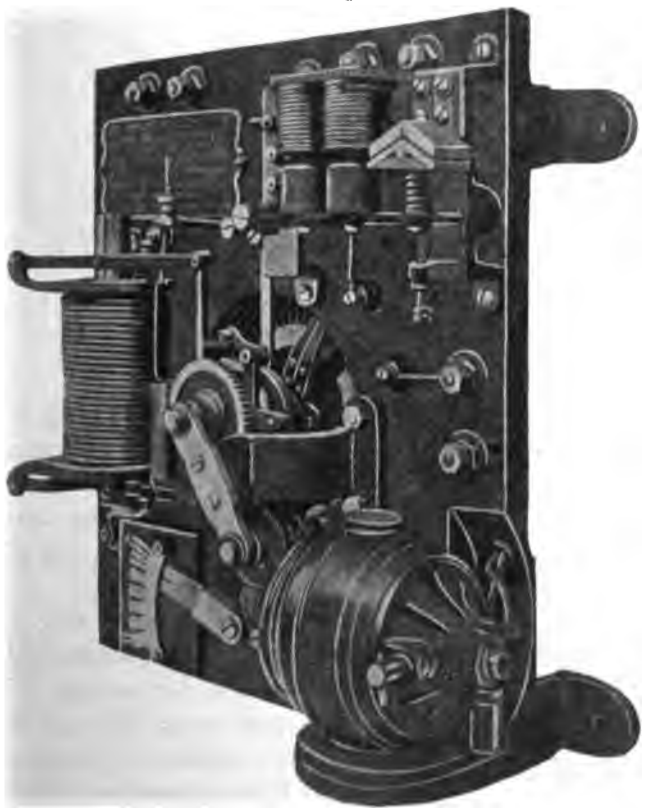


Fig. 44.

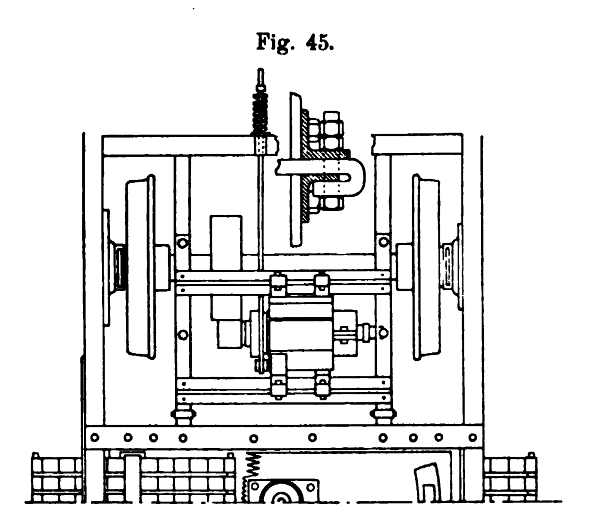


versetzt, dass er nach Bedarf Widerstand in die Erregerleitung ein- oder ausschaltet.

Da auf diesem Wege auch entweder gleichzeitig mit den Lampen oder bei Tage allein ein mit einem Ventilator in Verbindung stehender Elektromotor in Thätigkeit versetzt wird, ist ein Widerstand vorgesehen, welcher in die Leitung eingeschaltet wird, wenn einer dieser beiden Teile abgestellt werden soll. Die Anordnung dieser Einrichtung ist in der Fig. 44 zur Ansicht gebracht.

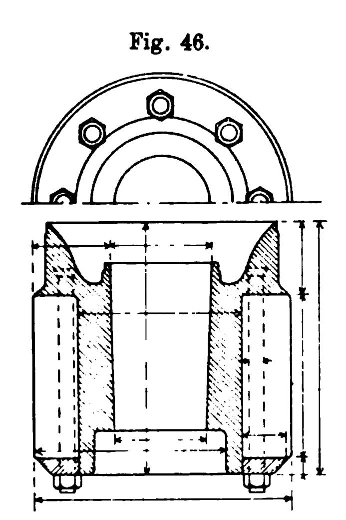
Dieses System, welches rein selbstthätig wirkt und sich selbstthätig reguliert, steht seit ca. 1½ Jahren auf der New York-Central- und Hudson-River-, der Pennsylvania-, der Baltimore- und Ohio-, sowie

Fig. 45.



der Union-Pacific-Eisenbahn in Verwendung und soll die Ventilation und Beleuchtung der damit ausgerüsteten Wagen ein vollkommene sein.

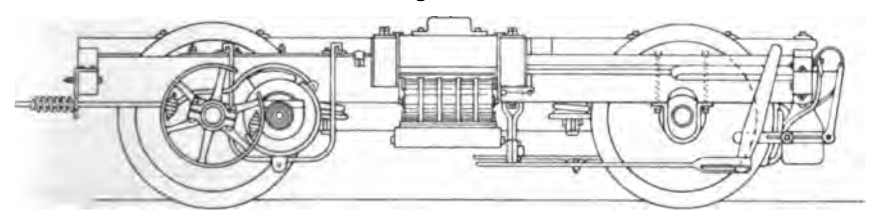
Fig. 46.



Das Beleuchtungssystem von Morris Moskowitz. Ueber dieses System der elektrischen Zugsbeleuchtung, welches auch als Axle-System bekannt ist, sind die verlautbarten Mitteilungen sehr dürftig, so dass nach selben kein klares Bild über das Zusammenwirken der einzelnen Teile gewonnen werden kann. Wie aus diesen Mitteilungen zu entnehmen, wird die sich selbst erregende Dynamomaschine gleichfalls von einer der Wagenachsen angetrieben (Fig. 45, 46 und 47), wobei jedoch die Uebertragung nicht mittels Zahnrädern, sondern mittels Friktionsscheiben erfolgt. Ueber die Art und Weise der Regulierung fehlen alle Details und lässt sich nur das eine konstatieren, dass die Gleichrichtung des Stromes, die Konstanthaltung der Spannung, die An- und Abschaltung der Dynamomaschine auf elektrischem Wege erfolgt und die zugehörigen Apparate alle in einem

kleinen Schranke untergebracht sind. Die hier gleichfalls unentbehrlichen Akkumulatoren der Chloridtype werden in einem unterhalb des Wagenkastens befindlichen Schranke eingeschoben und besteht jede Batterie aus 15 Zellen. Die Beleuchtung ist eine sehr reichliche, indem in jedem Wagen 17 mit Reflektoren ausgerüstete Glühlampen vorhanden sind und auch die Plattformen der Wagen durch je eine Lampe beleuchtet werden. Der Kraftbedarf soll, wenn alle Lampen in einem Wagen brennen, nicht mehr als zwei Pferdestärken betragen und stellen sich demnach die Kosten der Beleuchtung sehr gering. Dieses System steht auf der Atchison-Topeka- und Santa Fé-Eisen-

Fig. 47.



bahn seit 5 Jahren in Verwendung und soll sehr zufriedenstellende Resultate ergeben haben. In jüngster Zeit wurde selbes auch auf der Delaware- und Lackawanna-Bahn eingeführt.

Bemerkenswert und speziell die Verhältnisse Amerikas beleuchtend ist die Thatsache, dass sich zur Verwertung der einschlägigen Patente die Electric Axle Light and Power Company mit einem Kapital von 25 Millionen Dollars gebildet hat und dieselbe daran geht, durch Anwendung von analogen Methoden die Abkühlung der im Betriebe befindlichen 13 000 Wagen, welche dem Transporte leicht verderblicher Waren dienen, durchzuführen.

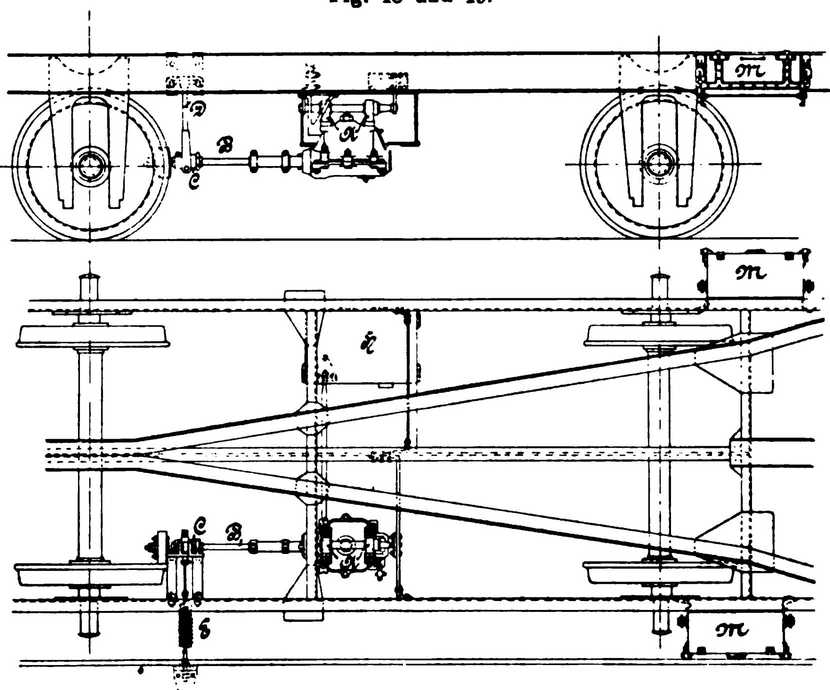
Das System der elektrischen Eisenbahnwagenbeleuchtung von M. Auvert. Bei diesem auf der Paris—Lyon—Mittelmeer-Bahn versuchsweise eingeführten Systeme der elektrischen Wagenbeleuchtung wird der wechselnden Klemmenspannung der von der Wagenachse angetriebenen Dynamo durch einen kleinen, mit Bremse versehenen Serienmotor, der dem Dynamostrom entgegenarbeitet, zu begegnen gesucht. Sobald der Dynamostrom eine im vornehinein bestimmte Maximalgrösse erreicht hat, beginnt der kleine Motor trotz des Bremsdruckes zu laufen, wodurch die Energieerzeugung konstant erhalten wird.

Ist die Klemmenspannung der anfänglich durch die Akkumulatorenbatterie erregten Dynamomaschine geringer als die der Batterie,

so bleibt die Verbindung zwischen Maschine und Batterie durch einen automatischen Ausschalter unterbrochen. Erreicht die Klemmenspannung der Dynamomaschine bei sich steigernder Zugsgeschwindigkeit jene der Batterie, so schaltet dieser Ausschalter die Dynamomaschine selbstthätig parallel an die Batterie.

Steigert sich die Zugsgeschwindigkeit nach und nach und mit ihr die Klemmenspannung der Dynamo, so versorgt dieselbe die Lampen und die Magnetwickelung mit Strom, um endlich auch nach erreichtem

Fig. 48 und 49.



Maximum die Akkumulatoren zu laden. Bei Ueberschreiten dieses Maximums beginnt der Regulator und zwar insolange zu wirken, als die Spannung nicht auf das Normale und darunter zurückgeht.

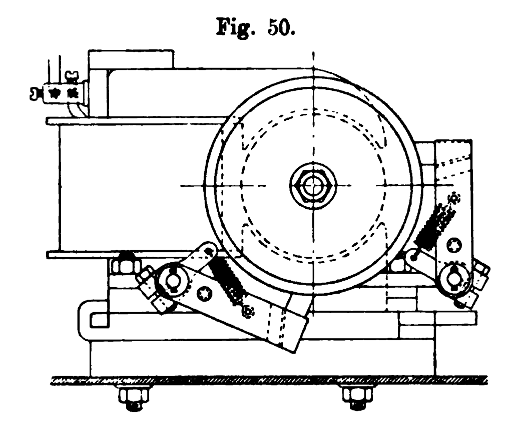
Ausser diesem Regulator und dem selbstthätigen Ausschalter gelangt noch ein selbstthätiger Stromwender zur Anwendung, welcher die Stromrichtung unabhängig von der Fahrtrichtung macht.

Die zweipolige Dynamomaschine mit glatter Grammewickelung und Kohlenbürsten gibt bei 1350 Umdrehungen des Ankers pro Minute einen Strom von 30 Ampère bei 15,5 Volt.

Die Dynamomaschine ist an einer Welle A A (Fig. 48 und 49) aufgehängt und wird, um ein seitliches Pendeln derselben zu verhüten, noch mit einer Rundstange an das Untergestelle befestigt. Die Ankerwelle ist nach der einen Seite hin durch eine gelenkige Welle B verlängert, welche eine mit Leder überzogene Friktionsscheibe trägt, die sich an die Innenseite des Radreifens eines der Wagenräder anlegt. Diese Welle ist zur Abschwächung starker seitlicher Stösse mit der Ankerwelle durch eine starke Kautschukröhre verbunden und ausserdem nächst der Friktionsscheibe bei C kugelig gelagert. Eine Spiralfeder E presst die Friktionsscheibe mit einem Zuge von 30 kg an den Radreifen an.

Diese Art des Antriebes und der Aufhängung der Dynamomaschine, die etwas seltsam erscheint, war dadurch bedingt, dass

Fig. 50.



die erwähnte Bahn noch unversenkte Schiebebühnen im Betriebe hat und bei einer anderen Art der Bewegungsübertragung zu befürchten war, dass die Dynamo in den Lichtraum dieser Schiebebühnen gekommen wäre.

Der Regulator zur Begrenzung der Stromstärke ist ein zweipoliger Serienmotor (Fig. 50) mit gleichfalls glatter Grammearmatur, auf dessen Achse eine kleine Bronzescheibe befestigt ist, auf welche zwei Kohlenklötze federnd gepresst aufliegen. Die Spannung der Federn ist nun derart bemessen, dass der am Scheibenumfang erzeugte Reibungswiderstand gleich der motorischen Kraft ist, welche der Motor entwickelt, wenn der durch denselben geleitete Strom 28 Ampère beträgt. Dies tritt erst dann ein, wenn die Zugsgeschwindigkeit 50 km pro Stunde überschreitet, so dass der Motor für alle Geschwindigkeiten unter 50 km fest gebremst bleibt.

Bei 50 km beginnt der Anker des Elektromotors sich erst langsam und dann immer schneller in Bewegung zu setzen, wodurch der Strom bei 28 Ampère stehen bleibt, weil das Anwachsen der Dynamospannung durch die gegenelektromotorische Kraft des Motors aufgehoben wird.

Von dem Strome von 28 Ampère werden 16 Ampère für die Lampenspeisung, 8 Ampère zum Laden der Akkumulatoren und 4 Ampère für die Erregung der Dynamomaschine, sowie die Bethätigung des Ausschalters und Stromwenders ausgenützt.

Sinkt die Zugsgeschwindigkeit unter 50 km, so vermindert sich der Ladestrom der Batterie und fällt bald auf Null. Bei weiterem Abfallen der Zugsgeschwindigkeit übernimmt die Batterie die Speisung der Lampen und der selbstthätige Ausschalter schaltet die Dynamomaschine von der Batterie ab.

Der selbstthätige Ausschalter besteht aus einem Solenoide, dessen aus dünnem Drahte hergestellte Windungen mit den Klemmen der Dynamomaschine verbunden sind. Ein an einer Feder aufgehängter Kern aus weichem Eisen, welcher in die Spule hineinragt, steht an seinem unteren Ende mit einem Kontakthebel in Verbindung, welcher sich, sobald der Kern die Spannung der Feder überwindet, daher hinreichend weit in das Solenoid hineingezogen wird, umlegt und einen Kontakt schliesst, durch welchen die Dynamomaschine an die Batterie geschaltet wird. Sinkt der Erregerstrom des Solenoides unter die bestimmte Grenze, wodurch die Feder das Uebergewicht erhält und den Kern der Spule emporhebt, so schaltet sich die Dynamomaschine wieder selbstthätig von den Batterien ab.

Der selbstthätige Stromwender besteht aus einem kleinen Doppelhebel, an dessen jedem Ende ein Cylinder aus Weicheisen befestigt ist, der in ein Solenoid von doppelter Bewickelung taucht. Die eine Bewickelung erhält ihren Strom von der Batterie, dessen Richtung immer die gleiche ist, und die andere Bewickelung von der Dynamomaschine, deren Strom je nach der Fahrtrichtung in der Richtung wechselt. Je nachdem sich nun diese beiden Ströme unterstützen oder einander entgegenwirken, kippt der Hebel entweder nach rechts oder links um, wodurch die entsprechenden Kontakte geschlossen werden.

Die angewendete Akkumulatorenbatterie besteht aus acht Zellen, wiegt inklusive Trog 208 kg und besitzt eine nutzbare Kapazität von 180 Ampèrestunden, so dass selbe für 8 bis 9 Stunden ausreicht.

Ein mit diesem System ausgerüsteter Wagen hat 29000 km ohne Störung im Betriebe zurückgelegt und soll die Beleuchtung eine stets ruhige und kräftige gewesen sein. Nur bei Zu- und Abschaltung der

Dynamo sollen sich momentane Schwankungen, die jedoch ohne Bedeutung waren, ergeben haben.

Hiemit erscheint, wiewohl noch einige Methoden zur Beleuchtung der Eisenbahnzüge nach dem gemischten Betriebe in Vorschlag gebracht wurden, der in Rede stehende Gegenstand dennoch erschöpft, weil die diesbezüglichen Veröffentlichungen kein genaues Bild über die Gesamtausgestaltung derselben gewinnen lassen.

Von weittragender Bedeutung für die Möglichkeit der allgemeinen Einführung der elektrischen Beleuchtung der Eisenbahnzüge ist die Kostenfrage, da ja das ganz ungeheure Kapital, welches für die Umgestaltung der im Betriebe befindlichen Personenwagen erforderlich wäre, nur dann hiefür aufgewendet werden dürfte, wenn sich die Betriebskosten billiger oder mindestens ebenso hoch stellen wie die der heute üblichen Beleuchtungsmethoden.

Die in grösserem Massstabe durchgeführten bisherigen Versuche beschränken sich zumeist auf den reinen Akkumulatorenbetrieb und sind die damit erzielten Ergebnisse durchaus nicht ermutigend.

So betrugen die Kosten der Beleuchtung, bezogen auf die 10kerzige Lampenbrennstunde, nach der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure Nr. 4 vom Jahre 1896, auf der

Jura-Simplon-Bahn	5,90	Pf.
Dortmund-Escheder-Bahn . . .	4,70	„
Dänische Staatsbahnen . . .	10,00	„
Nord-Milano-Bahn	13,00	„

Auf der k. k. priv. Kaiser Ferdinands-Nordbahn betragen diese Kosten inklusive Verzinsung und Amortisation 2,90 Pf.

Die ganz abnormen Differenzen in diesen Angaben zeigen am besten, dass man noch lange nicht an der untersten Grenze angelangt ist, und ferner auch, dass die Ursache dieser abnorm hohen Preise wohl ganz wo anders zu suchen ist, als in der Unzulänglichkeit der dermaligen elektrischen Beleuchtungseinrichtungen.

Zumeist befindet man sich noch im Experimentierstadium, bei welchem mit kleinen unzulänglichen Mitteln gearbeitet und aus den Ergebnissen ein Schluss für den Grossbetrieb gezogen wird, der zu gänzlich falschen Ansichten führen muss.

Es können daher die obigen Angaben also nur als sicher ganz gewissenhaft gesammelte und zusammengestellte Daten, welche sich auf Probebetriebe beziehen, angesehen werden, welche aber einen Rückschluss auf einen Grossbetrieb bei allgemeiner Einführung der

elektrischen Beleuchtung nicht gestatten. Ausserdem ist noch in Erwägung zu ziehen, dass möglicherweise ungünstige Betriebs- und sonstige lokale Verhältnisse das gewonnene Ergebnis mit herbeiführten und sohin ein Bild ergeben, welches verzerrt erscheint und nicht der Wirklichkeit entspricht.

Der heutige Standpunkt der Elektrotechnik gestattet es jedoch, ohne dass man befürchten muss, allzu grosse Fehler zu begehen, sowohl die Anlage- als auch Betriebskosten für die Durchführung der elektrischen Zugsbeleuchtung im vornehinein zu berechnen.

Es soll demnach zur Beleuchtung dieser Frage eine von dem Verfasser bereits anderweitig veröffentlichte Berechnung wiedergegeben werden, in welcher allerdings nur mit groben Ziffern gerechnet wurde, die Annahmen aber so gehalten sind, dass sie das zu gewinnende Endresultat eher ungünstig als günstig beeinflussen.

Als Grundlage für diese Berechnung dient vorerst die Annahme, dass 500 Wagen im Dauerbetriebe mit ausreichender Beleuchtung versorgt werden. Die totale Kerzenstärke pro Wagen betrage in Normalkerzen 140 und die tägliche Fahrtdauer eines Wagens sei im Durchschnitt mit 36 Stunden bemessen. Zur Anwendung gelangen zweiwattige Lampen, welche zwar eine viel kürzere Lebensdauer als die dreiundeinhalbwattigen Lampen haben, aber, wie die Versuche bei den k. k. österreichischen Staatsbahnen lehren, sich trotzdem ökonomischer erweisen, wie ja überhaupt dort, wo die Stromkosten grosse sind, sich die Anwendung niederwattiger Lampen empfiehlt.

Die längste Beleuchtungsdauer eines solchen Wagens in den Wintermonaten beträgt bei der Annahme, dass der Wagen abends 8 Uhr von der Ausgangsstation wegfährt und in dieselbe nach Ablauf der 36 Stunden 8 Uhr morgens zurückkehrt, 28 Stunden, und muss die Kapazität der zur Verwendung gelangenden Akkumulatorenbatterien dieser Beleuchtungsdauer entsprechend bemessen werden.

Um an Akkumulatorenzahl möglichst zu sparen, wird die Lampenspannung möglichst nieder zu nehmen sein, und sei dieselbe, einem Beispiele der Praxis folgend, mit 48 Volt angenommen. Bei einer Durchschnittsspannung von 2 Volt pro Zelle wird die Batterie in Berücksichtigung dessen, dass ein Teil der Spannung in den Leitungen verzehrt wird, welcher bei den geringen Leitungslängen hoch mit 2 Volt angenommen werden kann, aus 25 Zellen bestehen müssen.

Die Entladungsstromstärke wird $\frac{140 \,.\, 2}{50} = 5{,}6$ Ampère betragen müssen und hat demnach die Batterie eine Kapazität von $28 \,.\, 5{,}6 =$

156,8 Ampèrestunden zu besitzen. Hieraus sind die Anhaltspunkte für die Berechnung des Gewichtes der Akkumulatoren gewonnen. Da die Akkumulatoren im Interesse der guten Erhaltung nicht ganz entladen werden dürfen, muss deren Kapazität höher angenommen werden, und sei hiefür der Betrag von 200 Ampèrestunden eingesetzt.

Das Gewicht einer derartigen, in Ebonit eingebauten, aus 25 Zellen bestehenden Batterie kann inklusive Holzkasten, nach einem späteren Beispiele entnommenen Daten, hoch mit rund 950 kg angenommen werden.

Hiedurch sind nun auch die Grundlagen für die Berechnung der elektrischen Zentrale gegeben. Da 500 Wagen eingerichtet sind, und jeder derselben 36 Stunden läuft und ungefähr 12 Stunden in der Ausgangsstation ruht, ehe er zu neuer Verwendung herangezogen wird, gelangt jede dieser Wagenbatterien ungefähr nach 48 Stunden zur neuerlichen Ladung und müsste daher die Zentralstation für die Ladung von 250 Batterien innerhalb 24 Stunden bemessen werden. Da jedoch auch Reservebatterien in Bereitschaft gehalten werden müssen, um im Falle des Versagens einer dieser Batterien als Ersatz eingestellt werden zu können, sei eine Leistungsfähigkeit der Zentrale für die gleichzeitige Ladung von 300 Batterien innerhalb von 24 Stunden vorausgesetzt.

Der Wirkungsgrad der Akkumulatoren kann mit 65 % der eingelieferten Energie bemessen werden und hat demnach die Leistungsfähigkeit der Generatormaschine + 2 % Zuschlag für Spannungsverluste in den Widerständen und Leitungen

$$\frac{200 \,.\, 50 \,.\, 100 \,.\, 100 \,.\, 300}{65 \,.\, 98 \,.\, 28 \,.\, 1000} = 168 \text{ Kilowatt}$$

zu betragen.

Um vollkommen sicher zu gehen, wird dieselbe jedoch mit 175 Kilowatt anzulegen sein, sofern dieselbe nicht für andere Zwecke mit ausgenützt werden soll.

Auf Grund dieser Daten lassen sich nunmehr auch die Anlage- und Betriebskosten ermitteln. Nach allgemeinen Erfahrungsdaten beziffern sich die Durchschnittskosten einer derartigen Generatorstation für obgedachte Leistung mit 1050 M. für das zu leistende Kilowatt, also insgesamt mit 183 750 M., in welchem Betrag die Kosten für den Grunderwerb nicht inbegriffen sind.

Nimmt man nun die gesamten Baukosten der Zentrale inklusive Grund mit 200 000 M. an und stellt einen ferneren Betrag für die Akkumulatorengerüste, die Transportwagen, den automatischen Batterieausschalter u. s. w. von 25 000 M. ein, so betragen die Anlagekosten rund 225 000 M.

Die Anzahl der benötigten Akkumulatorenbatterien beträgt für 500 Wagen, da die Sätze doppelt genommen werden müssen, weil ja immer eine Batterie sich in Ladung, die andere im Betriebe befindet, inklusive einer 10%igen Reserve in Summa 1100.

Die Kosten einer derartigen Batterie von 950 kg Gewicht betragen, den Preis pro Kilogramm derselben sehr hoch mit 2 M. angenommen, 1900 M. und daher insgesamt für 1100 Batterien 2 090 000 M.

Die Kosten der Einrichtung eines Wagens lassen sich mit 400 M. inklusive allem Zubehör pro Wagen schätzen und entfällt sonach für 500 Wagen ein Betrag von 200 000 M. Die Gesamtanlagekosten beziffern sich sonach mit:

a) Zentrale	225 000 M.
b) Wagenbatterien . . .	2 090 000 „
c) Wagenausrüstung . . .	200 000 „
Summa	2 515 000 M.

Geht man nun zu der eigentlichen Betriebskostenberechnung über, welche erst einen Einblick in den ökonomischen Effekt gestattet, so muss vor allem darauf hingewiesen werden, dass die Beleuchtungsdauer mit der Jahreszeit zusammenhängt und daher innerhalb des Zeitraumes von einem Jahre erheblich schwankt. Es ist daher ein Durchschnitt zu finden, der am besten aus der kürzesten und längsten Beleuchtungsdauer ermittelt wird. Die maximale Beleuchtungsdauer eines Wagens innerhalb 48 Stunden wurde bereits mit 28 Stunden angegeben. In den Hochsommermonaten wird es genügen, wenn die Lampen von 8 Uhr abends bis 4 Uhr morgens brennen, was einer Beleuchtungsdauer von 16 Stunden innerhalb 48 Stunden pro Wagen entspricht. Demnach wird die durchschnittliche tägliche Beleuchtungsdauer eines Wagens $\frac{28 + 16}{4} = 11$ Stunden betragen.

Die Energiemenge, welche die Akkumulatoren für die Beleuchtung eines Wagens à 140 Normalkerzen bei Verwendung von zweiwattigen Glühlampen innerhalb 11 Stunden zu liefern haben werden, beträgt demnach unter Einrechnung des 2%igen Spannungsverlustes in den Leitungen 3150 Wattstunden. Dementsprechend haben die Generatormaschinen unter Einrechnung der in den Akkumulatoren und den Ladeleitungen entstehenden Verluste von 35 bezw. 2% an den Klemmen pro Wagen täglich $\frac{3150 \cdot 100 \cdot 100}{65 \cdot 98} = 4950$ Wattstunden oder für 500 Wagen 2475 Kilowattstunden abzugeben.

Die Gesamtleistung der Zentrale beträgt demnach, ununter-

brochenen Betrieb vorausgesetzt, 2475 . 365 = 902 375 oder rund 900 000 Kilowattstunden.

Die Selbstgestehungskosten einer Kilowattstunde ohne Verzinsung und Amortisation können bei einem derartigen kontinuierlichen Betriebe, welcher eine volle Ausnützung der verfügbaren Maschinenkraft ermöglicht, mit 5 Pf. angenommen werden. Da sich aber Manipulationsschwierigkeiten, wie der Transport der Akkumulatorenbatterien von den Wagen zur Ladestelle und umgekehrt ergeben, und auch die Ueberwachung der Ladung einen Mehraufwand erheischt, seien die reinen Selbstkosten der Kilowattstunde mit 8 Pf. berechnet.

Wir haben demnach an Auslagen:

a)	Selbstgestehungskosten der Elektrizitätserzeugung . .	72 000 M.
b)	8 % Verzinsung und Amortisation des für die Elektrizitätszentrale und die Wageneinrichtung aufgewendeten Kapitals von 425 000 M.	34 000 „
c)	14 % Verzinsung und Amortisation für die Akkumulatorenbatterien von einem Kapitale von 2 090 000 M.	292 600 „
d)	2 % Erhaltungskosten v. Gesamtkapitale zu 2 515 000 M.	50 300 „
e)	Lampenauswechselung, 7000 Lampen, jede im Jahre 14mal auszuwechseln, 98 000 Lampen à 50 Pf. . .	49 000 „
	Summa	497 000 M.

Die Kosten einer 10kerzigen Lampenbrennstunde betragen demnach, da 7000 . 365 . 11 = 28 105 000 Lampenbrennstunden à 10 Kerzen in Berechnung kommen, 49 790 000 : 28 105 000 = 1,8 Pf. [1]).

Die Annahmen dieser Berechnung sind im allgemeinen, namentlich aber bei den Batteriegewichten so hohe, dass die bei der Endrechnung nicht in Betracht gezogene Versendung der Ersatz- und Reservebatterien, welche jedenfalls auch einen Aufwand an Geld erfordert, füglich vernachlässigt werden kann.

Wollte man die Batterien in den Wagen selbst laden, was durch Kabelzuführung von der Zentrale und Herstellung der Verbindungen mit den Batterien durch Steckkontakte leicht möglich wäre, so würde dies zwar die Manipulation wesentlich vereinfachen, aber eine bedeutend schnellere Aufladung hiedurch aber auch grössere Leistungsfähigkeit der Zentrale, somit auch einen grösseren Kapitalsaufwand bedingen. Die sich für den Betrieb infolge der erhöhten Verzinsungs- und Amortisationsquote, sowie durch die ungünstigere Ausnützung der Zentrale ergebenden Mehrauslagen würden aber durch die Ersparnisse in der

[1]) Verfasser ist auch auf anderem Wege, wobei die für den Automobilbetrieb gewonnenen Daten verwertet wurden, zu dem ganz gleichen Ergebnisse gelangt.

Manipulation, sowie die bessere Erhaltung der Batterien wieder wett gemacht, und dürfte sohin das Gesamtbild keine wesentliche Aenderung erfahren.

Ueber die Kosten des gemischten Betriebes mit von einer der Wagenachsen angetriebenen Dynamo sowohl für die Beleuchtung ganzer Züge, als auch für die Einzelwagenbeleuchtung liegen bereits eingehende Berechnungen vor, von welchen je ein Beispiel hier zur notwendigen Ergänzung zur Anschauung gebracht werden soll.

Die der Berechnung zu Grunde gelegten Annahmen sind: Die Zugsgarnitur besteht aus 10 Wagen diverser Klassen, es gelangen 3½ wattige Glühlampen zur Verwendung und die Stärke der Beleuchtung beträgt im Durchschnitte 100 Normalkerzen pro Wagen.

Die Anlagekosten betragen:

1	Stück Wagendynamo, vollständig geschlossen und aufmontiert mit einer Leistung von 80 Ampère bei 90 Volt, einer Tourenzahl von 400 bis 1600 pro Minute, Gewicht etwa 1000 kg	4 400 M.
1	Stück Schalttafel inkl. aller erforderlichen automatischen Schalt- und Regulierapparate, Messinstrumente und Widerstände, Gewicht etwa 160 kg	2 200 „
10	Stück komplette Kuppelungen à 15 kg	1 000 „
9	Stück Lampenumschalter à 4 kg	450 „
10	Stück Zugsbatterien à 36 Zellen für eine Leistung von 40 Ampèrestunden bei einer Entladungsstromstärke von 4 Ampère, Gewicht 180 kg	6 000 „
10	Stück Wagen komplett montiert inkl. Leitungsmaterial, Sicherungen, Lampenfassungen und Glühlampen, Beleuchtungskörper nicht inbegriffen	2 600 „
	Sohin in Summa	16 650 M.

Die Betriebskosten werden wie folgt berechnet:

a) Amortisation und Verzinsung 7 % des Anlagekapitals . .		1165,50 M.
b) Erhaltung:		
1. Dynamo 2,5 %	110,00 M.	
2. Apparate 2,5 %	55,00 „	
3. Kuppelungen 2,5 %	25,00 „	
4. Lampenumschalter 2,5 %	11,30 „	
5. Batterien 7 %	420,00 „	
6. Installation 2,5 %	65,00 „	686,30 „
c) Betriebskosten:		
1. Mehrkohlenbedarf auf der Lokomotive .	526,00 M.	
2. Lampenersatz	144,00 „	
3. Beaufsichtigung	278,20 „	948,20 „
Somit totale laufende Ausgaben pro Jahr		2800,00 M.

Demnach kosten pro 10kerzige Lampenbrennstunde bei einer täglichen Brenndauer von 6 Stunden und Leistung einer Gesamtlichtstärke von 1000 Normalkerzen $\frac{2800,00 \cdot 10}{365 \cdot 6 \cdot 1000} = 1,28$ Pf.

Analog berechnen sich die Kosten der 10kerzigen Lampenbrennstunde für die Einzelwagenbeleuchtung bei Annahme einer totalen Lichtstärke von 140 Normalkerzen pro Wagen bei einer Lampenspannung von 35 Volt wie nachstehend:

Anlagekosten:

1 Stück Wagendynamo, vollständig verschlossen, komplett montiert, Leistung 20 Ampère bei 85 Volt und einer Tourenzahl von 400 bis 1600 pro Minute, Gewicht etwa 400 kg	1800,00 M.
1 Stück Apparatenschrank mit allen erforderlichen automatischen Regulier- und Schaltapparaten und Widerständen, Gewicht 160 kg	1200,00 „
2 Stück Akkumulatorenbatterien à 18 Zellen in Ebonit eingebaut, jede für eine Leistung von 80 Ampèrestunden, bei einer Entladestromstärke von 5 Ampère, Gewicht 380 kg	1300,00 „
4 Stück Schalter für hell und dunkel	72,00 „
Leitungsmaterial und Montage eines Wagens	228,00 „
Totales Anlagekapital für einen Wagen	4600,00 M.

Betriebskosten:

a) Amortisation und Verzinsung des Anlagekapitals 7 %		322,00 M.
b) Erhaltung:		
1. Dynamo, Apparate, Installation 2,5 %	82,50 M.	
2. Batterien 7 %	91,00 „	173,50 „
c) Betriebsunkosten:		
1. Mehrkohlenbedarf 2300 PS-Stunden à 4 Pf.	92,00 M.	
2. Lampenersatz	24,00 „	
3. Schmiermaterial und sonstiges	38,50 „	154,50 „
Totale laufende Ausgaben pro Jahr		650,00 M.

Hiebei wurde von der Annahme ausgegangen, dass die Lampen täglich 9 Stunden brennen, somit 140 . 9 . 365 = 460 000 Kerzenbrennstunden für die Berechnung in Betracht zu ziehen sind. Hienach belaufen sich die Kosten für die Brennstunde einer 10kerzigen Lampe auf $\frac{650,00 \cdot 10}{460\,000} = 1,12$ Pf.

Wie man sieht, übt eine grössere Anzahl der durchschnittlichen täglichen Brennstunden der Lampen einen verbilligenden Einfluss aus. Zu dieser Kalkulation ist noch zu bemerken, dass die Kosten der Pferdekraftstunde bei Annahme eines 70%igen Wirkungsgrades der

Dynamomaschine mit 4 Pf. oder einer Kilowattstunde mit ∾ 5,44 Pf. angesetzt erscheinen. Diese Kosten erscheinen wohl etwas zu gering geschätzt, eine sichere Berechnung bleibt aber in diesem Falle unmöglich, indem sowohl die Kosten der Kraft, als auch der Wirkungsgrad der Maschine mit Rücksicht auf die bei der Uebersetzung entstehenden Reibungsverluste zu Ungunsten der Rechnung höher bezw. niedriger einzuschätzen sein werden.

Das Endergebnis vermag jedoch eine solche doch nur in Bezug auf die Endziffern in Betracht kommende Erhöhung dieser Ansätze kaum zu beeinträchtigen und würde man höchstens nur auf jene Ziffer gelangen, welche für den reinen Akkumulatorenbetrieb ermittelt wurde.

Nach einer von der Firma Julius Pintsch in Glasers Annalen, Nr. 475 vom Jahre 1897, veröffentlichten Mitteilung über die Kosten der Oelgasbeleuchtung pro 10kerzige Lampenbrennstunde betragen dieselben bei Verwendung von Intensivlampen 2,2 Pf., bei Verwendung von gewöhnlichen Lampen 3,4 Pf., also im Durchschnitt 2,8 Pf.

Stellt man diesen Ziffern die ermittelten Kosten für die elektrische Beleuchtung mit gleicher Lichteinheit, welche für die reine Akkumulatorenbeleuchtung 1,6 Pf., für die gemischte Zugsbeleuchtung 1,28 Pf. und für die Einzelwagenbeleuchtung 1,12 Pf. beträgt, gegenüber, so ergibt sich, selbst wenn man, um sicher zu gehen, diese kalkulierten Preise um weitere 50% erhöht, auch vom ökonomischen Standpunkte die Ueberlegenheit der elektrischen Beleuchtung. Erwägt man ferner die Vorzüge des elektrischen Glühlichtes, welche in der selbst durch die stärkste Erschütterung nicht beeinflussbaren Stetigkeit der Flamme, der Teilbarkeit desselben bis zu den kleinsten Lichtintensitäten und in der absoluten Gefahrlosigkeit desselben bestehen, so muss es befremden, dass dieser Gattung der Zugsbeleuchtung bisher noch nicht jene Aufmerksamkeit gewidmet wurde, die dieselbe verdient.

Experimentelle Untersuchungen auf dem Wechselstromgebiete.

Von

Oberingenieur **Thomas Marcher,** Dresden.

Mit 50 Abbildungen.

Im Laufe meiner Laboratoriumsthätigkeit bei der Aktiengesellschaft Elektrizitätswerke vormals O. L. Kummer & Co. habe ich eine Reihe von Versuchen durchgeführt, die weder ausgenützt, noch in weiteren Kreisen bekannt geworden sind. Die neueren Publikationen, unter anderen diejenigen von Heyland[1]) über Asynchronmotore, von Fischer-Hinnen[2]) über Einphasenmotore, Feldmann[3]) etc. haben mich daran erinnert, da sie teilweise denselben Gegenstand behandeln, und in mir den Entschluss gereift sie zu veröffentlichen, einerseits um von unnützen Versuchen abzuhalten, soweit sie ein negatives Resultat ergeben haben, und andererseits um zu weiteren Untersuchungen anzuregen und praktische Erfolge daraus zu erzielen.

Ich beginne mit den Versuchen über einen

I. Selbstanlaufenden Einphasenmotor ohne Kollektor und Bürsten.

In Heft 32 der E. T. Z., Jahrg. 1901 berichtet J. Fischer-Hinnen, dass ein Wechselstrommotor nach Skizze Fig. 1 anläuft, sobald man Wechselstrom in den Anker schickt und die Bürsten in die Linie a c d. h. so einstellt, dass sie unter die Polkanten zu stehen kommen. Ebenso läuft ein Motor nach Skizze Fig. 2 an, bei dem Strom in die Magnete geschickt und der Läufer kurz geschlossen wird. Fischer-Hinnen folgert daraus auf einen Motor mit zwei

---

[1]) E. T. Z. Heft 32, 1901.

[2]) E. T. Z. Heft 32, 1901.

[3]) E. T. Z. Heft 39, 1901.

Magnetsystemen, das erste gegen das zweite um $\frac{90}{p}$ verschoben, der auf derselben Achse sitzend einen Doppelanker hat, Fig. 3 und 4, und der keinen Kollektor mehr besitzt, wobei p die Polzahl bezeichnet.

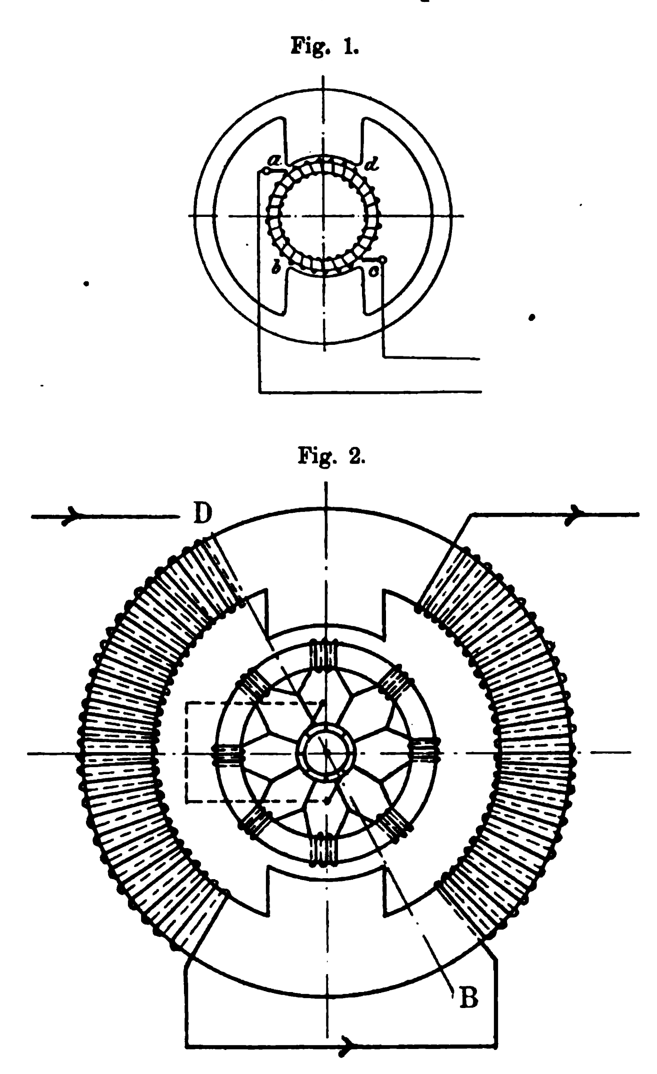


Fig. 1.

Fig. 2.

In den Jahren 1896 und 1897 habe ich mit derartigen Anordnungen mehrfache Versuche angestellt, und musste zunächst die Erfahrung machen, dass der Gegenstand im Prinzipe schon im Jahre 1894 von John F. Kelly in Amerika zum Patente angemeldet worden war,

wie aus der Fig. 5 hervorgeht, welche seine Anordnung wiedergibt. Ob die Magnetpole oder die zwei auf derselben Achse befindlichen Läufer um $\frac{90}{p}$ verschoben sind, ist natürlich gleichgiltig.

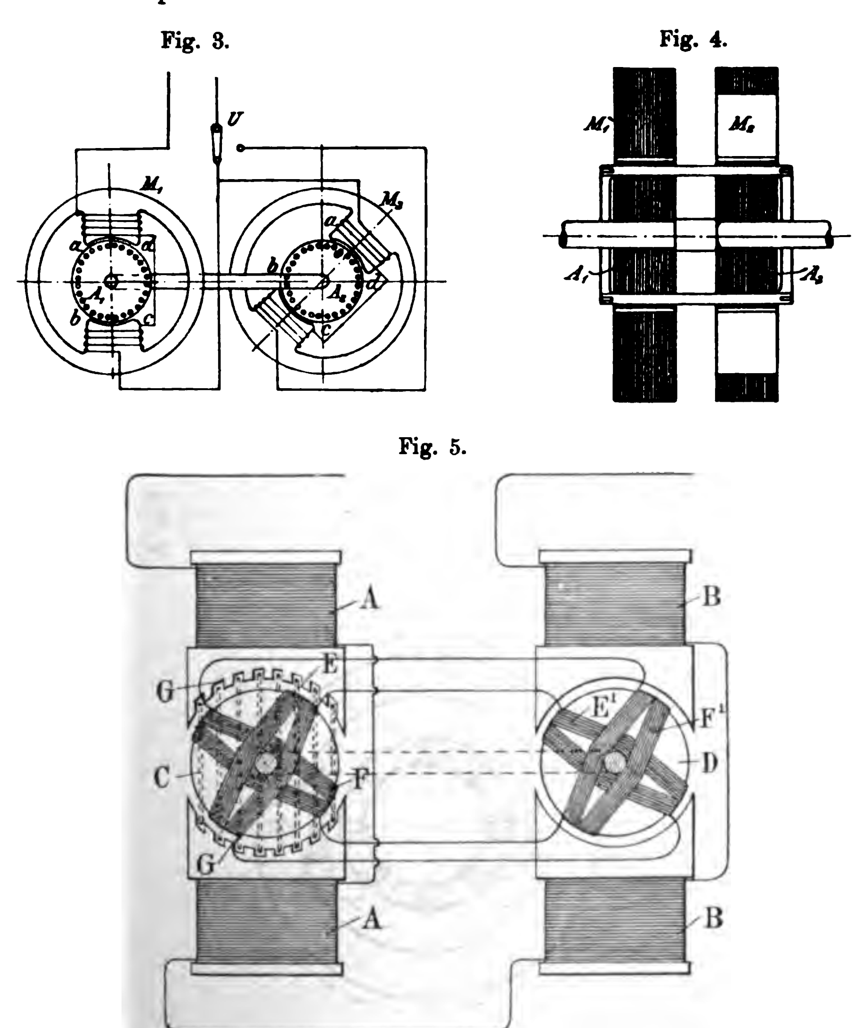


Fig. 3.

Fig. 4.

Fig. 5.

Was nun meine Anordnung betrifft, so diene zur Erklärung die Fig. 6. Der Teil links, der den Strom von ausserhalb aufnimmt, ist der Umformerteil, hingegen ist derjenige rechts, welcher den Strom vom Umformerteile erhält, der Motorteil. In der Figur hat der Umformerteil sowohl im Ständer Pr als im Läufer Sr eine zweipolige

Ringwickelung. Der Läufer des Motorteiles A besitzt eine zweipolige Ringwickelung, der Ständer hat eine zweipolige Ringwickelung und Polvorsprünge M. Pr ist durch I und II an die Aussenleitung angeschlossen. Die Wickelung Sr führt von 1, 2, 3 u. s. w. zu 1, 2, 3

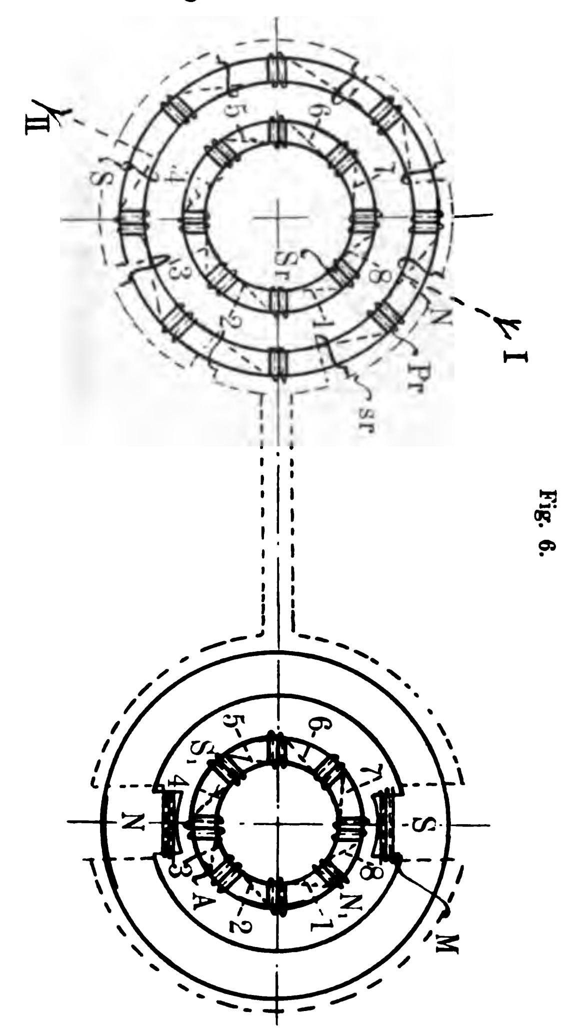


Fig. 6.

der Wickelung A. M ist an sekundäre Windungen sr angeschlossen, die sich auf dem Ständer des Umformerteiles befinden. Die Polarität $N_1 S_1$ von A ist gegen M um $\frac{90}{p}$ verschoben.

Das Resultat dieser Anordnung ist, dass die Drehrichtung von beiden Läufern entgegengesetzt gerichtet ist. Wenn auch das Dreh-

moment im Motorteile überwog, so kam doch nur eine Differenzwirkung zum Ausdruck. Der Wirkungsgrad betrug nur bis zu 10 %, hingegen war cos φ verhältnismässig ziemlich hoch.

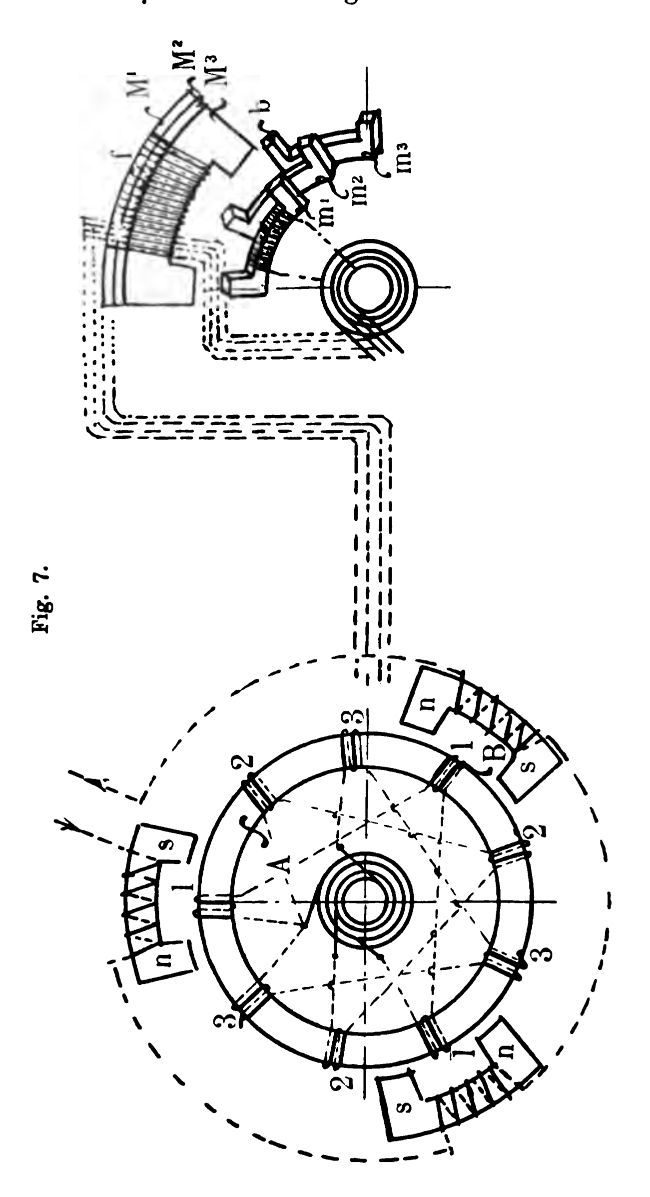


Fig. 7.

Da nach der eben beschriebenen Einrichtung, sowohl vom Umformerteil in den Motorteil, als auch umgekehrt induziert wurde, so

sollte nach der Anordnung Fig. 7 eine vollständige magnetische Trennung vorgenommen werden. Sowohl der Umformer- als auch der Motorteil besitzen einzelne Hufeisenelektromagnete n s, M[1] etc. Der

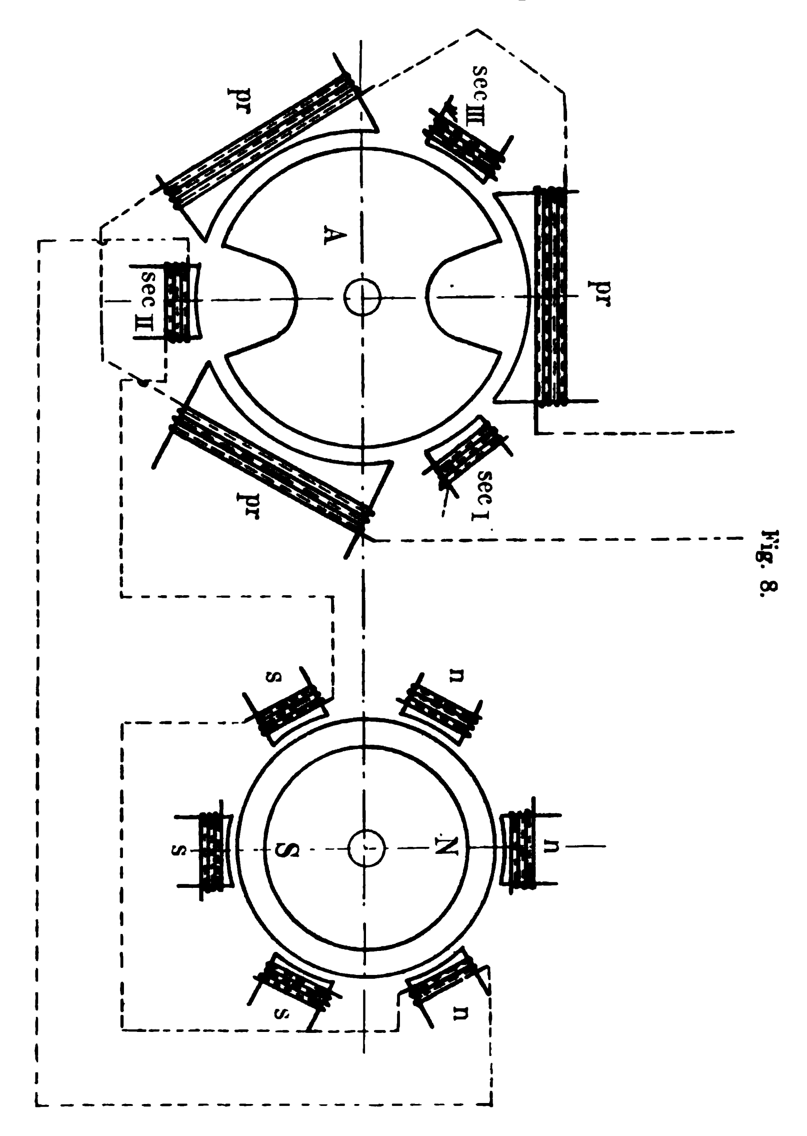


Fig. 8.

Läufer im Umformerteile hat Ringwickelung; von hier führen einzelne Spulengruppen wie 1, 1, 1, 2, 2, 2, 3, 3, 3 vermittelst Schleifringen zu den Elektromagneten im Motorteile, von hier wieder durch Schleifringe zu den Elektromagneten des dazugehörigen Läufers m[1] etc. und

in den Läufer des Umformerteiles durch eine gemeinsame Leitung zurück. Die Elektromagnete im Motorteile stehen von den dazugehörigen Spulengruppen des Läufers im Umformerteile um $\frac{90}{p}$ ab,

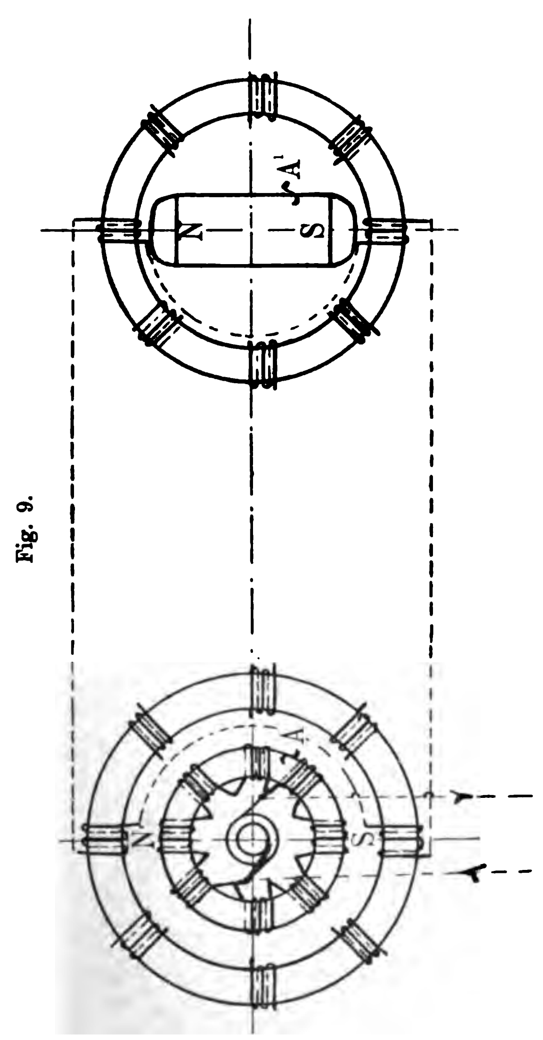


Fig. 9.

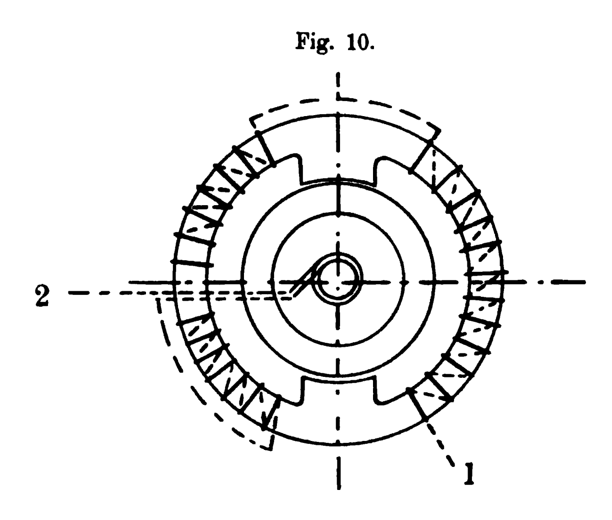
so dass man annehmen könnte, es werde M^1 an m^1, M^2 an m^2 u. s. w. angezogen. Allein es ergab sich wieder das Resultat, dass die Läufer die Tendenz haben gegeneinander zu rotieren. Eine weitere und zwar der Fig. 6 ähnliche Anordnung gibt die Fig. 8 wieder. Der Umformerteil besitzt daselbst einen geteilten Eisenkörper A, der seiner

Form nach in den einzelnen Spulen sec I, sec II, sec III nacheinander von Pr Induktion hervorruft. Die sekundären Spulen des Umformerteiles sind mit entsprechenden Spulengruppen des Ständers am Motorteile verbunden, so dass bei Drehung des Körpers A im Motorfelde ein Drehfeld entsteht, welches die Drehung des dazu gehörigen Läufers verursachen sollte. Allein weder diese noch die Anordnung nach Fig. 9 ergab ein positives Resultat. In letztgenannter Figur sind die Ständerspulen des Umformerteiles mit den entsprechenden Spulen des Motorteiles, welche beide in Ringform gewickelt sind, miteinander verbunden. Der Läufer A im Umformerteile, der mit Strom beschickt wird, hatte ein zweipoliges Feld, hingegen war als Läufer für den Motorteil ein rechteckiges, geteiltes Eisenstück A^1 gewählt. Solange diese Läufer lose auf der Achse sitzen, stellen sie sich gegeneinander, wie in der Fig. 9 skizziert, ein. Sind sie nun auf der Welle festgekeilt, so sollte der Läufer A^1 folgen, sobald man A dreht, und es sollte auf die Weise eine magnetische Umschaltung stattfinden. Dies ist auch der Fall, allein das Drehen von A braucht ebensoviel Kraft als wie diejenige ausmacht, mit der A^1 nacheilt.

II. Synchronmotor mit Wechselstromerregung.

Des ferneren hatte ich eine Anordnung nach Fig. 13, bestehend aus einem Anker A, und zwei einander gegenüberstehenden Magneten M.

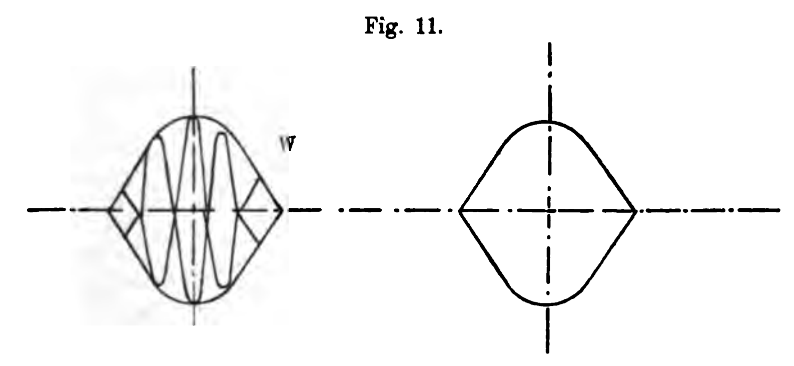
Fig. 10.



Wurde in diese Wechselstrom geschickt und der Anker gedreht, so erhielt der induzierte Strom eine Kurvenform nach Fig. 11 für Ein-

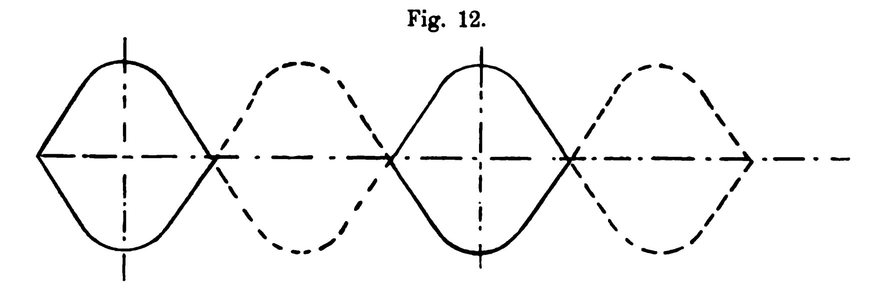
phasen und nach Fig. 12 für Zweiphasen. Diese Kurvenform wurde mit oscillierend intermittierend bezeichnet. Wie viel Wechsel w in

Fig. 11.



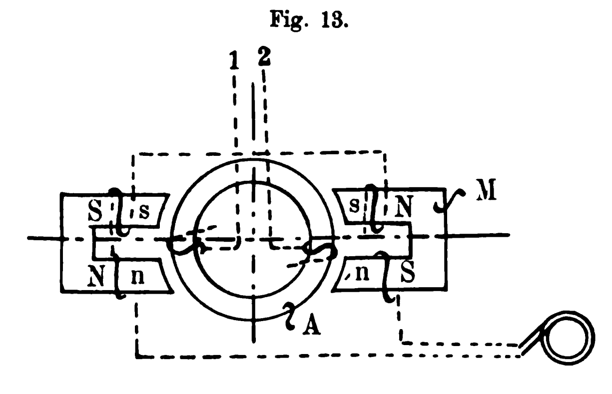
einer Kurve enthalten sind, hängt von der Geschwindigkeit ab. Wählt man die Anordnung nach Fig. 13 als Umformerteil, und eine weitere

Fig. 12.



Anordnung nach Fig. 10 als motorischen Teil, schickt in die Magnete des Umformerteiles Strom, verbindet 1 1, 2 2 und treibt dann die auf ge-

Fig. 13.



meinsamer Achse befindlichen Läufer bis zum Synchronismus an, so läuft die Vorrichtung als Synchronmotor auch unter Belastung weiter.

Besser eignet sich als motorischer Teil hierzu eine Vorrichtung nach Fig. 14. Die Elektromagnete M befinden sich auf einer Achse. Die vier Anker M′ sind feststehend. Dabei können die Magnete am Umformerteile nach n s statt N S (Fig. 13) geschaltet sein, was für die ganze Wirkung bedeutend günstiger ist. Der Umformerteil kann

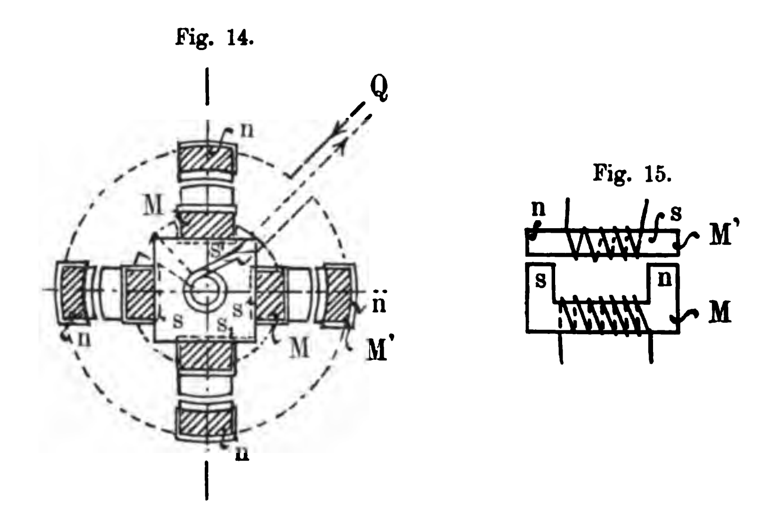
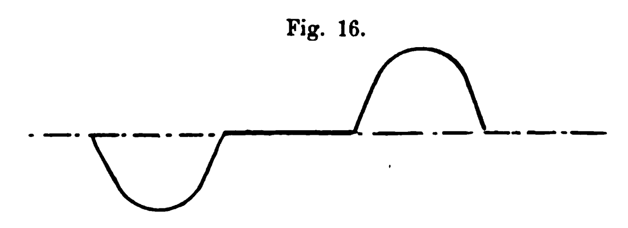


Fig. 14.

Fig. 15.

entbehrt werden, wenn man den Strom gleich in der Maschine intermittierend erzeugt, dies geschieht z. B. durch eine Maschine nach Fig. 17, welche sich von den gewöhnlichen Wechselstrommaschinen dadurch unterscheidet, dass je zwei aufeinander folgende Pole gleiche

Fig. 16.

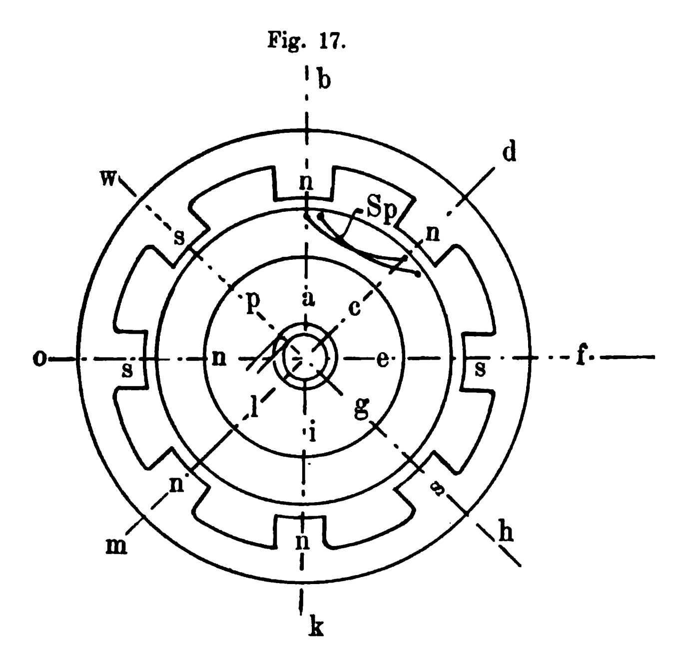


Polarität besitzen. Eine derartige Maschine liefert Strom nach der Kurvenform Fig. 16. Während sich die Spule Sp in der gezeichneten Stellung bewegt, ist die Induktion = 0, hingegen entsteht Strom von c d bis e f etc. Nimmt man hierzu den motorischen Teil, wie oben Fig. 14, so wird die gleiche Wirkung erzielt. Besser eignet sich hierzu an der Maschine Ringwickelung.

III. Wechselstrombatterie.

Die Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom durch einen Stromwender nach Art des Polakschen Apparates zum Laden von Akkumulatoren hat den Nachteil, dass man nur den oberen Teil der Wechselstromkurve ausnützen kann, da während des unteren Teiles die Spannung zu gering ist, und infolge dessen von den Akkumulatoren Strom zurückströmen würde. Es ist deshalb auch nicht möglich das Umschalten am Stromwender zu einer Zeit geschehen zu

Fig. 17.



lassen, zu welcher derselbe stromlos ist. Ausserdem kann man den Gleichstrom bei Entladung nicht wieder in Wechselstrom umwandeln, so dass ein Parallelarbeiten nicht möglich ist.

Diesem Uebelstande Abhilfe zu schaffen, sind mehrfach Anordnungen ersonnen worden. Eine solche Anordnung ist z. B. durch Patentschrift Nr. 53 537 bekannt geworden. Es werden daselbst eine Reihe Akkumulatorenzellen hintereinander geschaltet und während des Ladens durch synchron um einen Stromsammler umlaufende Bürsten die Zellen nach Art eines Zellenschalters entsprechend der Stromkurve zu- und abgeschaltet. Die Aufgabe konnte jedoch dadurch nicht gelöst werden, weil mit dem Ab- und Zuschalten von Zellen, nach Art eines

Zellenschalters das Kurzschliessen beim Uebergange von einer Zelle zur anderen unzertrennlich verbunden ist, und da jede Zelle bei jeder Umdrehung einmal kurzgeschlossen wird, so geht fast die gesamte hineingeladene Energie dadurch verloren.

In E. T. Z., Heft 15, 1897 habe ich beschrieben, wie man den Kollektor zur Kurvenaufnahme benützen kann. Ein kleiner Synchronmotor trieb eine Bürste an, die auf einem Kollektor schliff und so die Spannung auf denselben auftrug. 1898 habe ich eine ähnliche Vorrichtung benützt, um die Verteilung des Feldes am Umfange des Ständers aufzunehmen. Zu dem Zwecke wurde in sämtlichen Ständernuten je eine bestimmte Anzahl Hilfswindungen verlegt und die Enden zum Kollektor geführt, von wo dann die Spannung jeder Spule durch eine kreisende Bürste aufgenommen wurde. An diese Vorrichtung wurde ich durch die Veröffentlichung von Clarence Feldmann betreffend einen neuen Umformer von Leblanc E. T. Z. Heft 39, 1901 erinnert, denn schon aus meiner damaligen Vorrichtung war es möglich Gleichstrom aus dem Kollektor zu entnehmen. Eine weitere Anwendung des Kollektors zum Zwecke des Umformens ist in Fig. 18a dargestellt. Darnach wird die Wechselstromspannung, durch Kollektor C, zwei Schleifringe s, einen kleinen Synchronmotor und zwei kreisende Bürsten B in die einzelnen Wechselstromkurven K aufgelöst. Die Wechselstromkurve wird in ein Koordinatensystem eingetragen und sowohl längs der Abscissenachse in Zeitteile als der Ordinate nach in Spannungsteile gleich 2 Volt zerlegt. Die Einteilung lässt erkennen, wie viel Akkumulatorenzellen in jedem Zeitmomente nötig sind, um die Spannung bei vorgeschriebener Stromstärke aufnehmen zu können.

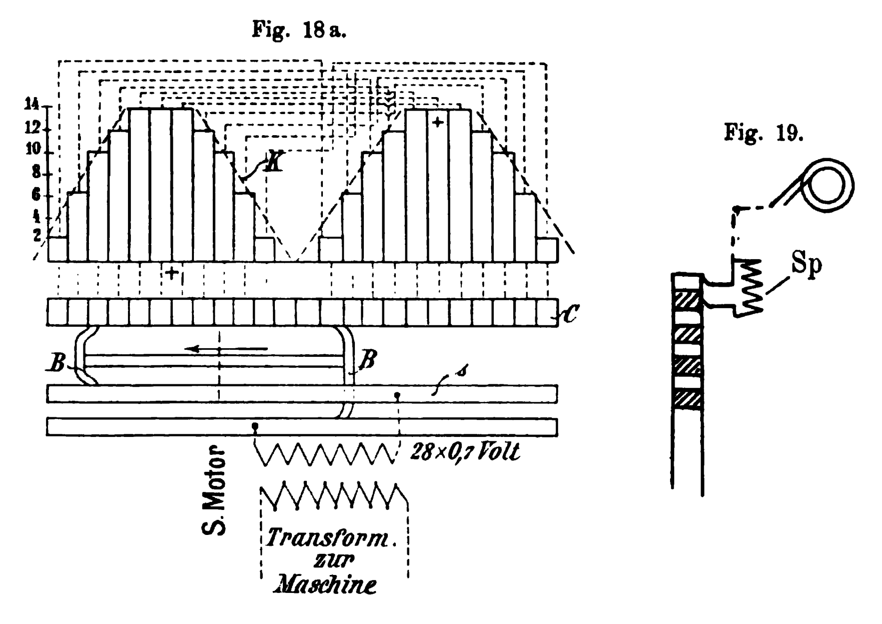
Fig. 18.

Es werden also die Akkumulatorenzellen in Gruppen parallel geschaltet an den Kollektor angeschlossen, wobei die Anzahl jeder Gruppe der Spannungsordinate angepasst wird. Verwendet man zum Laden eine Maschine, die einen ausgesprochenen O-Punkt besitzt, so geschieht das Laden vollständig funkenlos; denn es werden hier weder

Zellen kurz geschlossen, noch Gruppen von grösserer Spannungsdifferenz parallel geschaltet. Solange die Wechselstromspannung überwiegt, wird Strom in die Batterie hineingeladen, überwiegt die Spannung der letzteren, so gibt die Batterie Wechselstrom in das Netz ab, so dass ein vollständiges Parallelarbeiten, wie bei Gleichstrom, stattfindet. Die Schaltung lässt mannigfache Variationen zu. In Fig. 18a ist die Anordnung eine zweipolige. Dieselbe kann jedoch auch vier- und mehrpolig ausgeführt werden. Auch können die Zellen zur Er-

Fig. 18a.

Fig. 19.

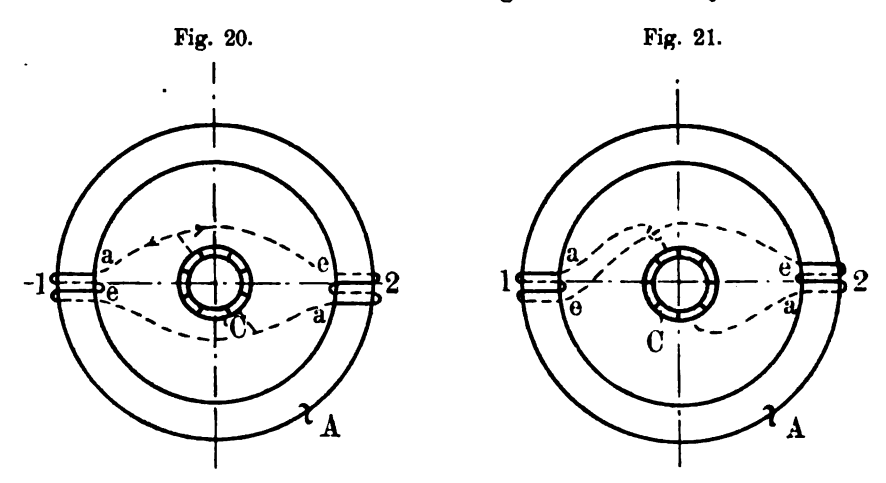


höhung der Spannung hintereinander geschaltet werden, wie in Fig. 18 angedeutet ist. Um die Zellenzahl nicht zu hoch wählen zu müssen, kann man die Batterie hintereinander schalten und die Schleifkontakte nach Art des Zellenschalters mit einer Induktionsspule Sp versehen, Fig. 19. Der in dieser Spule sich ausgleichende Strom ist Wechselstrom von sehr hoher Wechselzahl und kann deshalb die Spule nicht durchsetzen, während der Gleichstrom ungestört hindurchgeht. — Es sei eine kleine Abschweifung auf das Gleichstromgebiet gestattet.

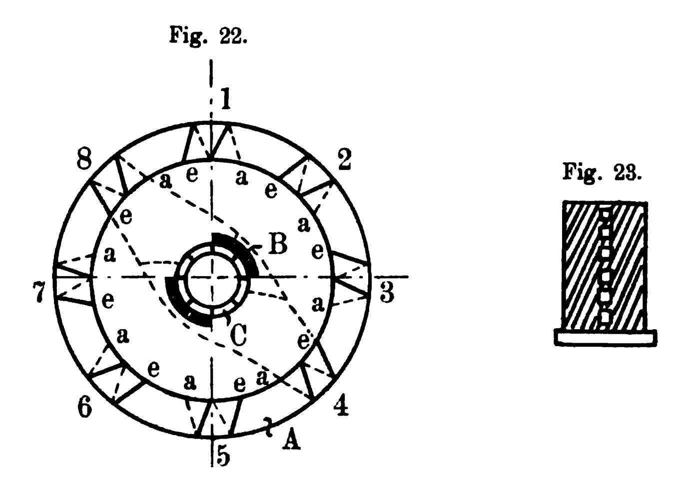
IV. Gleichstrommotor mit in weitesten Grenzen regulierbarer Tourenzahl.

Bei Gelegenheit der Untersuchungen zur Herstellung eines Einphasenmotors mit Kollektor, worüber ich eventuell noch berichten

werde, habe ich eine Anordnung nach den Fig. 20 bis 23 benützt. Bei derselben sind sämtliche Ankerspulen entweder nach Fig. 20 oder Fig. 21 parallel an den Kollektor angeschlossen und der Strom wird dem Kollektor durch breite Bürsten zugeführt. Besser jedoch ist es,



wenn man einen Kollektor mit spiralförmig gedrehten Lamellen benützt, Fig. 23, weil dann die gebräuchlichen Bürsten verwendet und ebenso angeordnet werden können, wie sonst üblich. Beträgt die



Drehung der Lamellen 120°, so können zwei Drittel derselben von den Bürsten überdeckt werden, sofern auf der ganzen Breite des Kollektors Bürsten aufliegen. Dieser Umstand gibt uns nun ein einfaches Mittel, die Tourenzahl in den weitesten Grenzen regulieren zu

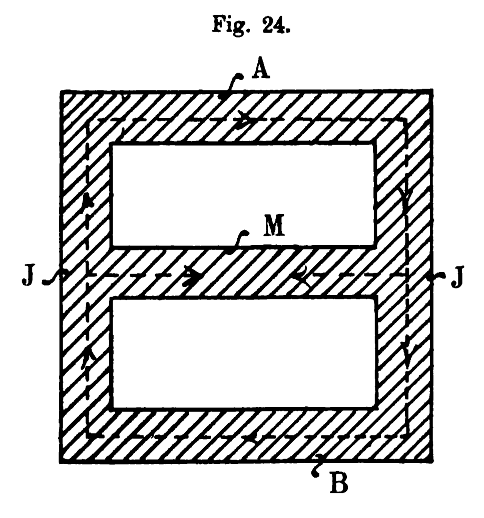
können. Denn liegen die Bürsten nicht mehr auf der ganzen Breite des Kollektors auf, sondern decken beispielsweise nur die Hälfte der Breite, so ist auch nur die halbe Anzahl Ankerwindungen eingeschaltet, die Ampèrezahl und somit die Ampèrewindungen im Anker betragen die Hälfte; ebenso ist das Drehmoment bei gleicher Belastung nur halb so gross und somit sinkt die Tourenzahl auf die Hälfte der vorherigen. Nimmt man z. B. sechs Bürstenpaare, so kann man auch die Tourenzahl in sechs Abstufungen regulieren. Nach dieser Anordnung habe ich einen Gleichstrommotor ausführen lassen; die Resultate waren ganz befriedigende. — Vor einigen Jahren war auf Herstellung eines solchen Motors ein Preis ausgeschrieben; es ist mir nicht bekannt geworden, ob damals eine befriedigende Lösung gefunden wurde.

Besonderen Vorteil bietet ein derartiger Motor beim Antriebe von Werkzeugmaschinen, überhaupt dort, wo die Umdrehungszahl grosse Aenderungen zulassen muss, da man dann Vorgelege, Stufenscheiben etc. erspart. Ein weiterer Vorteil ist der, dass man dabei den Anlasser erspart, indem dieser Motor von selbst, bei richtig gestellten Bürsten, mit geringer Tourenzahl zu laufen anfängt.

V. Dreileitertransformator.

Als ich im Jahre 1896 die ersten Transformatoren für Dreileiter abgleichen sollte, fand ich, dass wenn man einen Schenkel in den

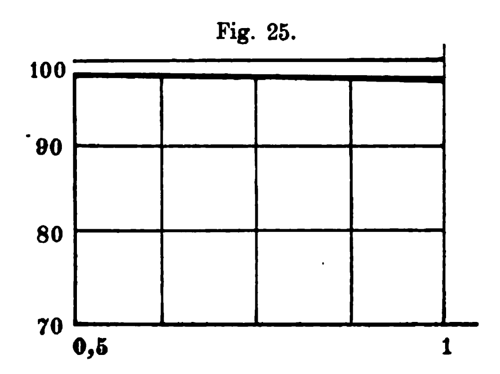
Fig. 24.



einen Zweig und den anderen Schenkel in den zweiten Stromzweig nimmt, dass sich bei Belastungsänderungen die beiden Zweige gegen-

seitig beeinflussen und zwar derartig, dass die Spannung im zweiten Zweige steigt, je mehr man den ersten belastet und umgekehrt. Diesem Uebelstande wurde dadurch abgeholfen, dass in jeden Zweig symmetrische Spulen des linken und rechten Schenkels genommen

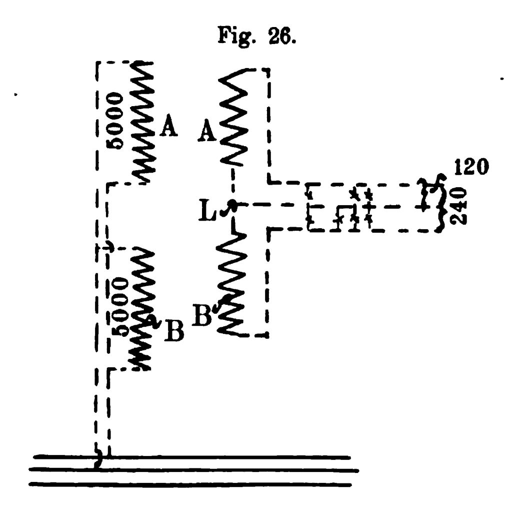
Fig. 25.



wurden. Hierüber hat die Union Elektr. Gesellschaft im Jahre 1897 ein Patent nachgesucht und erhalten, vergl. E. T. Z. Heft 49, p. 831, Jahrg. 1898.

Auf eine vollkommenere Weise erzielt man dieses Resultat,

Fig. 26.

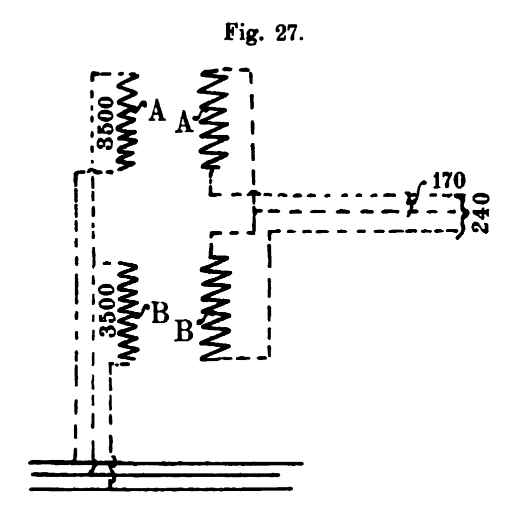


wenn man die Ausgleichung im Eisen geschehen lässt, Fig. 24. Ein solcher Transformator besteht in der Hauptsache aus den beiden Schenkeln A B, dem Mittel- oder Ausgleichsstück M und den Jochen J. Die Wickelung wird wie skizziert ausgeführt, das heisst Schenkel A und B werden primär parallel an die Aussenleiter ange-

schlossen. Die sekundäre Wickelung ist hintereinander geschaltet, wobei der Mittelleiter bei L abzweigt. Das Mittelstück M hat den gleichen Querschnitt wie die Schenkel und Joche. Eine Messung hat, wie Kurve Fig. 25 zeigt, ergeben, dass eine Beeinflussung selbst bei ganz ungleicher Belastung der Zweige nicht stattfindet, sondern dass die Spannung, abgesehen vom normalen Abfalle, vollständig konstant bleibt. Die Pfeile zeigen in der Fig. 24 die Richtung der Kraftlinien an. Das Schema Fig. 26 gibt die Schaltung in übersichtlicher Form wieder.

Derartige Transformatoren sind in der Zentrale Soborten bei Teplitz zur Verwendung gekommen. Es ist dies eine Zweiphasen-

Fig. 27.



hochspannungsanlage von primär 5000 Volt in den Aussenleitern und 3500 Volt Phasenspannung. Sekundär beträgt die Spannung in den Aussenleitern 240 und die Phasenspannung 170 Volt, demnach wird der beschriebene Dreileiterlichttransformator primär an 5000 Volt angeschlossen, wobei man sekundär 120mal 2 Volt erhält.

Der Zweiphasenkrafttransformator unterscheidet sich in der Konstruktion nur dadurch, dass dessen Mittelstück M 1,4mal so gross ist, der Schaltung nach jedoch, dass primär der Schenkel A in die eine und der Schenkel B in die andere Phase geschaltet wird, und dass sekundär der Zweiphasenmittelleiter zur Verwendung kommt, wie dieses Fig. 27 in übersichtlicher Weise erkennen lässt.

Bei dieser Gelegenheit soll die neue Konstruktion des Dreiphasentransformators Erwähnung finden; derselbe besteht, wie Fig. 29 zeigt,

aus oberen und unteren Grundblechen, die in Form eines gleichschenkeligen Dreieckes mit abgerundeten Ecken gebracht sind. Sie stehen aufrecht und laufen an den Stellen a b c zu einander parallel. An diesen Stellen sitzen die Kerne, deren aufrecht stehende Bleche hinwieder mit den Grundblechen parallel laufen. Diese Konstruktion

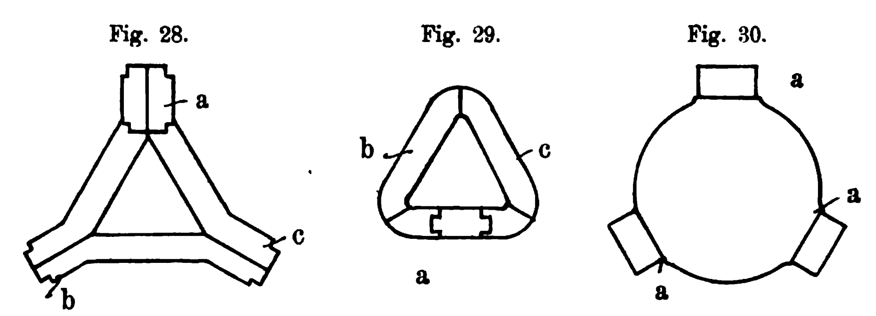


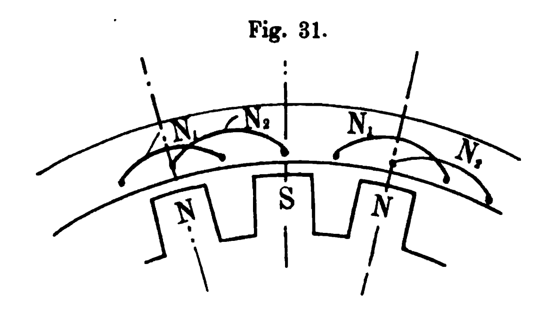
Fig. 28. Fig. 29. Fig. 30.

erinnert an die Dreieckschaltung und stellt in Bezug auf Symmetrie eine weit vollkommenere Lösung dar, als die Anordnung nach Fig. 28, besonders aber als Fig. 30 — eine in der Praxis ziemlich verbreitete Konstruktion — und zwar wegen der Stellung der senkrechten und horizontalen Blechen zu einander. An den Stossfugen a ist eine gute Isolierung der Flächen erforderlich.

VI. Zweiphasenwickelung.

In Kapps Technologie p. 20, Fig. 18 ist das Schema für Zweiphasenwickelung enthalten. Diese Wickelung ist einseitig zu nennen, denn es fehlt für den zweiten Pol die Wickelung. Bei den Zwei-

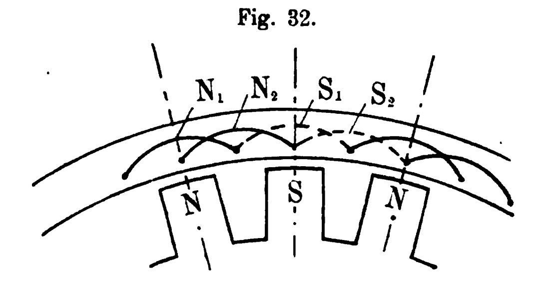
Fig. 31.



phasenwechselstrommotoren habe ich von vornherein, also seit 1895, die zweiseitige Wickelung angewendet. Der Unterschied ist folgender: In dem aus Kapp übertragenen Schema Fig. 31 bildet N_1, N_1 u. s. w. die Wickelung für die eine Phase. Man sieht, dass sich

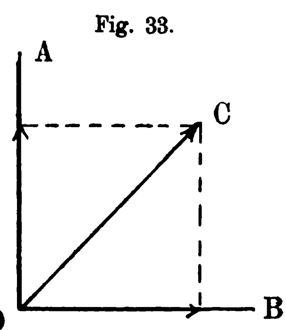
nur über jedem N-Pole eine Spule befindet, hingegen über dem S-Pole keine. In Fig. 32 ist das Schema der zweiseitigen oder symmetrischen Wickelung enthalten. Man sieht, dass die Wickelung über den N-

Fig. 32.



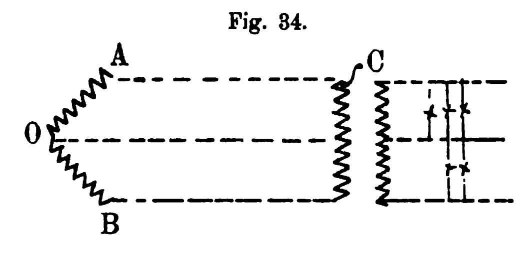
und S-Pol gleichmässig verteilt liegt. Es sind dadurch allerdings die Trennstellen der Segmente verschwunden, was die Bequemlichkeit der Montage sehr beeinträchtigt. Allein auch die Dreiphasenwickelung besitzt diesen Vorteil nicht.

Fig. 33.



Zu Anfang des Betriebes derartiger Zweiphasenanlagen mit unsymmetrischer Wickelung ergaben sich Erscheinungen, die zunächst unerklärlich schienen. Eine dieser Erscheinungen war die grosse Verschiedenheit der Phasenspannung Fig. 33 zwischen O A und O B, wenn der Strom nach Fig. 34 zumeist für Licht verwendet und die Spannung nur an dem Aussenleiter O C konstant gehalten wurde. Die Erklärung hierfür geben die Fig. 35 bis 37. Fig. 35 stellt den regelmässigen sinusförmigen Verlauf der Zweiphasenspannungskurven dar. Fig. 36 enthält deren Gestalt nach der Deformation durch induktive Belastung.

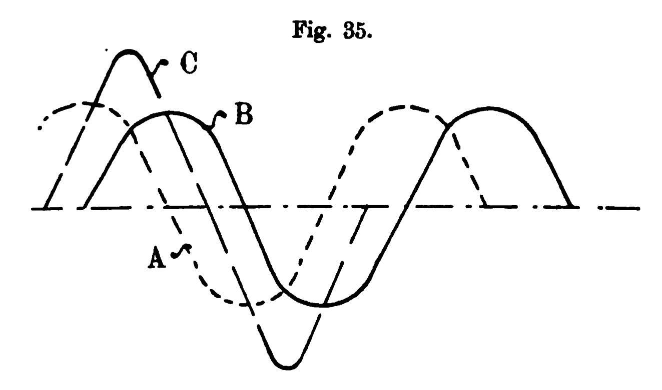
Fig. 34.



Man sieht daraus, dass die Fläche der Kurve O C diejenige von O A und O B verschieden weit überdeckt. Das Gleiche ergibt die graphische Darstellung Fig. 37. Diese Figur erhält man, wenn

die Spannung an den Aussenleitern konstant gehalten wird und die Phasenspannungen infolge von induktiver Belastung verschoben oder deformiert werden. Diese Darstellungen lassen es begreiflich erscheinen, dass die Phasenspannungen sich beispielsweise bei einer Probe im Verhältnis von 1700 zu 1100 bei konstanter Aussenspannung von 2000 Volt verhielten. Dass die Zähler bei den Zweiphasen-

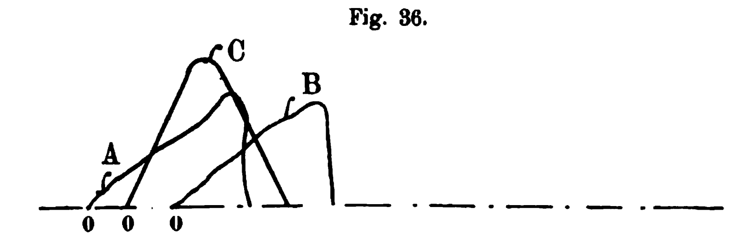
Fig. 35.



motoren, die natürlich in jeder Phase einen Zähler hatten, zeitweise in einer Phase rückwärts liefen, ist aus der Fig. 37 erklärbar.

Es kommt dies übrigens auch bei Dreiphasenmotoren vor. Die Deformation der Kurven ist bei einseitiger oder unsymmetrischer Wickelung, wenn die übrigen Verhältnisse in Bezug auf Windungen, Selbstinduktion etc. gleichbleiben, natürlich grösser als bei symmetrischer. An welcher Phase die Spannung erhöht und an welcher sie erniedrigt

Fig. 36.



wird, hängt von der Drehrichtung ab, was ja auch mit der Darstellung Fig. 37 übereinstimmt. Ebenso gibt die ungleiche Höhe der Spannung eine Erklärung für die ungleiche Stromstärke in den Phasen der Motore. Die Verzerrung der Kurven war mitunter so gross, dass durch den Mittelleiter nicht mehr Strom floss, als durch die Aussenleiter; diese Ungleichheit macht die Anwendung zweier Zähler zur Notwendigkeit.

In Bezug auf das Parallelschalten und Parallelarbeiten dieser Maschinen ergab es keinen grossen Unterschied, ob die Wickelungen symmetrisch oder einseitig waren. Beim Parallelschalten wurde die

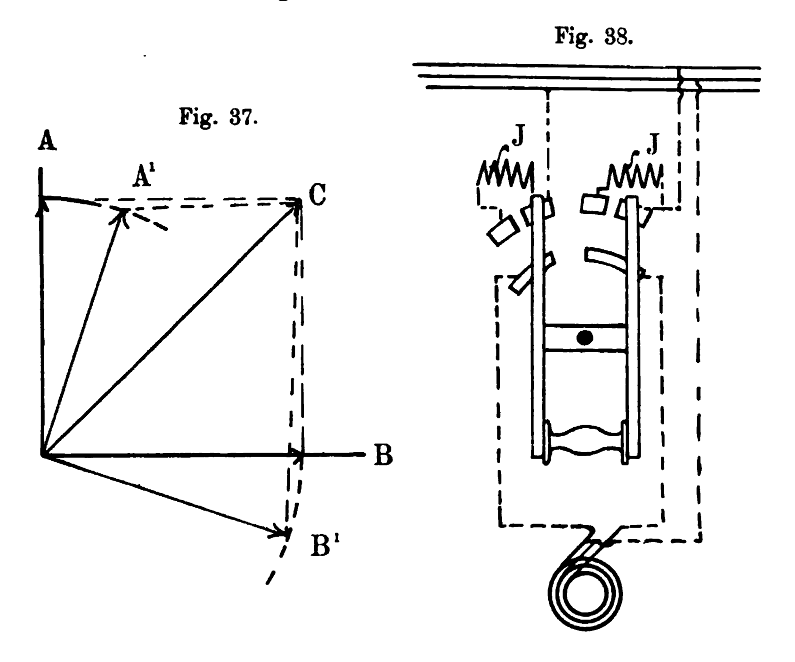


Fig. 37.

Fig. 38.

Vorsicht gebraucht, dass zwischen die laufende und zuzuschaltende Maschine ein kleiner abgeglichener Induktionswiderstand J, Fig. 38, eingeschalten wurde. Es geschah demnach das Zusammenschalten durch einen Zweistufenschalter.

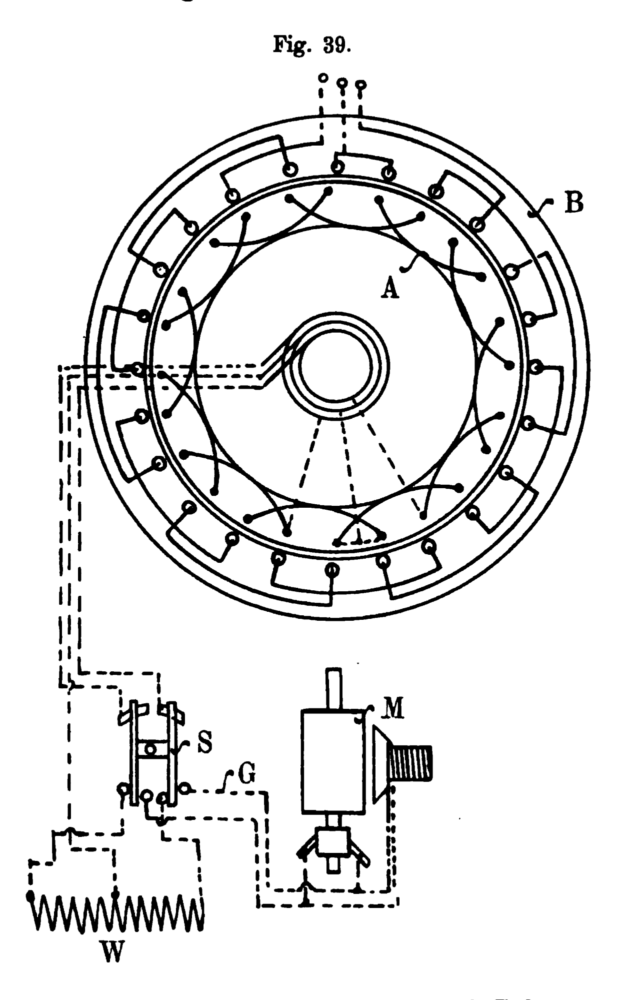
VII. Hochspannungssynchronmotor, der mit Belastung angeht.

Es war in einem besonderen Falle die Aufgabe gestellt, einen 60 PS-Zweiphasenhochspannungsmotor herzustellen, der mit Belastung angehen und dessen Wirkungsgrad, sowie cos φ nicht unter 0,88 sein sollte. Zur Erfüllung dieser Bedingungen wurde Ständer und Läufer von einem Asynchronmotor verwendet, Fig. 39, und der Ständer B nach gewöhnlicher Weise für Zweiphasenhochspannungsstrom bewickelt. Der Läufer A wurde wie ein Läufer mit Schleifringen bewickelt, so dass beim Angehen, wie die Figur zeigt, nach gewöhnlicher Art Widerstand W eingeschaltet und im Momente des Synchronganges auf die Gleichstromerregung durch einen Schalter S umgeschaltet wurde. Zu dem Zwecke durfte die Windungszahl im Läufer nicht zu hoch sein,

weil sonst bei eingeschaltetem Ständer und offenem Sekundärkreis im letzteren zu hohe Spannung aufgetreten wäre. Die geringe Windungszahl erforderte aber eine geringe Spannung des Erregerstromes.

Die Verhältnisse lagen so, dass der Ständer 2000 Volt erhielt, und die Gleichstromerregermaschine ca. 20 Volt. Der Motor erfüllte

Fig. 39.



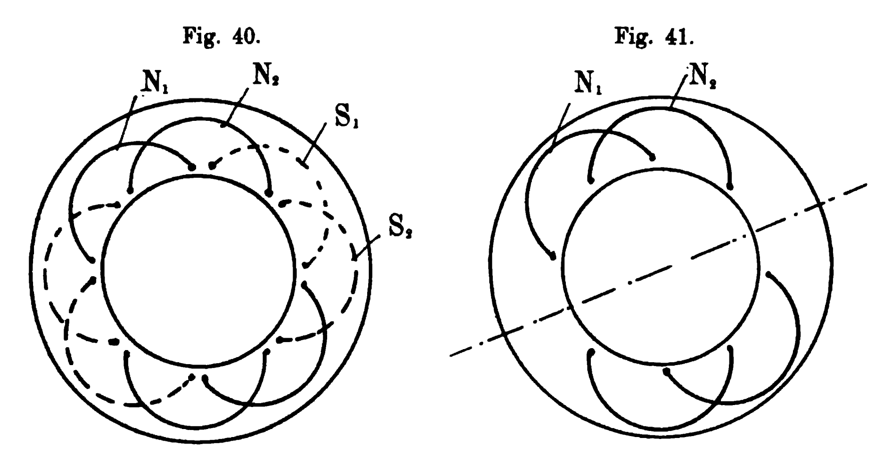
neben den anderen Bedingungen, die, dass er mit Belastung asynchron anging und synchron weiter lief, zur vollen Zufriedenheit.

Wenn man auf die gleiche Achse des Motors eine kleine Erregermaschine aufbringt, oder den Gleichstrom aus dem Anker selbst durch einen Kommutator entnimmt, dürfte man annähernd dasselbe erreichen, wie Heyland in E. T. Z. 1901 Heft 32 beschrieben hat.

VIII. Aufklappbarer Motor und Motor für verschiedene Tourenzahl.

Für gewisse Zwecke ist jedoch die einseitige Wickelung vorzuziehen, so wenn man einen Motor erhalten will, dessen Ständer teilbar oder aufzuklappen ist, wie es für Strassenbahnwagen erwünscht, Fig. 40, 41. Wenn man in Fig. 40 die gestrichelte Linie S weglässt, so ist die einseitige Wickelung fertig, Fig. 41. Sämtliche Spulen sind dann nach einer Richtung oder Polarität gewickelt. Erwähnt

Fig. 40. Fig. 41.



seien noch die Versuche der Umschaltung auf andere Pol- oder Tourenzahl bei Ein- und Mehrphasenmotoren. Solange Kurzschlussläufer verwendet werden konnten, genügte das Umschalten des Ständers.

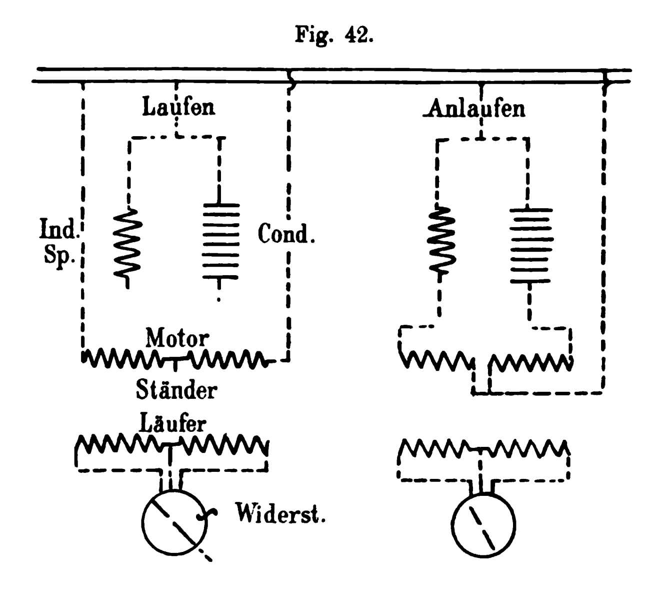
Bei Motoren mit Schleifringen muss gleichzeitig der Läufer umgeschaltet werden, wozu mindestens sechs Schleifringe nötig sind, es ist jedoch dabei zu beachten, dass bei geringer Polzahl nicht die volle Eisenfläche ausgenützt werden kann und dass deshalb, um ein entsprechendes Drehmoment zu erhalten, vom Ständer Windungen abzuschalten sind.

IX. Elektrischer Kondensator (Trockenkapazität).

Die Einphasenmotore unterscheiden sich äusserlich wenig von Zweiphasenmotoren, sogar die Wickelung ist auch bei ersteren zweiphasig ausgeführt. Dieselben haben jedoch, wie allgemein bekannt, die Eigenschaft, dass sie manchmal selbst leer schwer angehen. Um sie in dieser Hinsicht zu verbessern, benötigen sie sowohl bei der Herstellung einer grösseren Sorgfalt, als auch eines besonderen Apparates

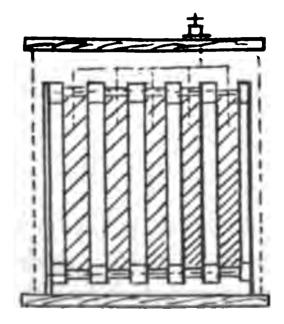
zum Anlassen, falls auf ein grösseres Drehmoment gerechnet wird. Bei der Herstellung hat man besonders darauf zu achten, dass die Zentrierung des Läufers im Gehäuse auf $^1/_{10}$ mm genau sei, ferner dass

Fig. 42.



die Ausbalancierung möglichst vollkommen, sowie die Induktion B beim Anlaufen gering sei. Eine besondere Wichtigkeit ist jedoch dem günstigsten Verhältnisse der Stabzahl zwischen Läufer und Ständer beizumessen. Dasselbe liegt erfahrungsgemäss zwischen 1,4 und 1,6 und ist am besten 1,5 zu wählen.

Fig. 43.



Der genannte Anlassapparat besteht in der Hauptsache aus einer Induktionsspule, welche in die erste Phase und einer Kapazität (Kondensator), welche in die zweite Phase eingeschaltet wird. Fig. 42 zeigt diese Schaltung schematisch dargestellt. Die Induktionspule hat die Eigenschaft, die Kurve nach rückwärts zu verschieben, hingegen die Kapazität nach vorn. Auf diese Weise entstehen in beiden Wickelungsabteilungen verschiedene Phasen, obwohl sie nur parallel an eine Phase angeschlossen worden sind. Die Verschiedenheit der Phasen kann 90° erreichen. Während es nun leicht ist eine der Wickelung entsprechende In-

duktionsspule herzustellen, hat dies mit der Kapazität seine Schwierigkeiten, denn eine Kapazität für eine so grosse Stromstärke, wie sie der Motor erfordert, etwa aus Stanniolblättern und mit Paraffin getränkten Papierzwischenlagen herzustellen, wäre nicht ausführbar: Eine solche würde eine zu grosse Dimension annehmen. Man hat deshalb den Versuch gemacht, einen Halbleiter von grosser spezifischer Induktionskapazität zu nehmen und den Strom durch denselben hindurchzuleiten, so dass er einerseits als induktionsfreier Widerstand und andererseits als Kapazität funktioniert. Brown Boveri wählten als solchen Körper übereinandergeschichtete Bleche, wobei die Zwischenräume mit durch Soda getränktem Wasser ausgefüllt werden. Diese Kapazität entbehrt jedoch jeder Stabilität, denn das Wasser verdunstet und die Sodasättigung sowie der Widerstand ändern sich. Um diese Uebelstände zu vermeiden, habe ich die sogenannte Trockenkapazität hergestellt, die in jeder Beziehung unveränderlich ist. Sie besteht, wie Fig. 43 zeigt, aus nebeneinander isoliert aufgestellten Platten. Die Platten werden gewonnen, indem man fein geriebene Glimmerabfälle mit Graphit in einem bestimmten Verhältnisse mischt, mit Sirup anmacht, und zu Platten geformt unter Glühhitze erhärten lässt. Der aus diesen Platten aufgebaute Apparat erfüllt auch maschinentechnisch seine Aufgabe. Die Motore gehen mit diesem Anlassapparat versehen mit drei Viertel bis ganzem Drehmoment an.

X. Läuferwickelung von Einphasenmotoren und einige Notizen.

Die Läuferwickelung von Einphasenmotoren muss zu mindest zweiphasig ausgeführt sein. In der ersten Zeit hatten diese Läufer ohne Unterschied der Grösse ausschliesslich zweiphasige Schaltung, und zwar waren soviel Spulen vorhanden als die Polzahl mal Phasenzahl abgab. Gelegentlich der Inbetriebsetzung von zwei 20pferdigen Motoren konnte eine sehr auffällige Beeinflussung des Lichtes beobachtet werden, welche von der Schlüpfung genannter Motoren herrührte. Diese Beeinflussung war um so grösser, je weniger das Netz bezw. die Primärmaschine belastet war. Beim Abendbetriebe, wo mehrere Wechselstrommaschinen parallel geschaltet auf das Netz arbeiteten, hörte die Beeinflussung fast ganz auf. Die Ursache wurde auf eine Gegeninduktion der Läuferspulen auf das Netz zurückgeführt.

In der Wickelung und Schaltung der Einphasenläufer sind indessen wesentliche Fortschritte gemacht worden. Zunächst hat man gefunden, dass dieselben gleichmässiger angehen und ebenso gut

funktionieren, wenn sie dreiphasig geschaltet sind, sodann löste man die Spulen in eine fortschreitende Wickelung auf, ähnlich der Wellenwickelung bei Gleichstromankern.

Nachdem ein derart verbesserter Läufer in die obengenannten Motore eingesetzt war, sind auch die Beeinflussungen vollständig verschwunden gewesen.

Eine andere auffällige Erscheinung konnte bei dieser Gelegenheit beobachtet werden. Es zeigten sich Abweichungen in der Messung beim Abbremsen, besonders in Bezug auf den Wirkungsgrad, je nachdem dieselbe zur Tages- oder Abendzeit vorgenommen wurde. Die Ursache konnte auf die sehr verschiedenen Gestaltungen der Spannungskurve an der Maschine zurückgeführt werden.

Die Maschine hatte nämlich grosse Selbstinduktion und änderte die Kurvenform von der spitzen zur flachen Form mit der Belastungsänderung in auffälliger Weise.

In einem zweiten Falle sollte ein von einer fremden Firma gelieferter Einphasenmotor tags über nicht angehen, wohl aber des Abends bei Lichtbetrieb. Die Ursache wurde darin gefunden, dass die Spannung des Abends um 5 % höher gehalten wurde. Es ist bekannt, dass das Drehmoment mit der Erhöhung der Spannung wächst, besonders wenn man in den Läufer induktionslosen Widerstand einschalten kann.

In der gleichen Zentrale kam der merkwürdige Fall vor, dass sich die Wechselstrommaschinen wohl sehr gut zusammen schalten, aber weniger gut auseinander nehmen liessen. Als ich den Vorgang beim Schalten beobachtete, fand ich, dass der Dampfmaschinenregulator mit einem, durch einen kleinen Elektromotor, verstellbaren Gewichte versehen war. Das Gewicht wurde beim Zusammenschalten vom Schaltbrett aus so verstellt, dass die Füllung allmählich grösser wurde. Nun wurde beim Abschalten einer Maschine wohl die Erregung allmählich zurück reguliert, so dass die Belastung der betreffenden Maschine geringer wurde, allein es blieb dabei eine bedeutende Stromstärke zurück, welche scheinbar nicht zu beseitigen war. Es stellte sich nun heraus, dass diese Stromstärke eine wattlose war und dadurch entstand, dass das Gewicht am Regulator nicht auf geringste Füllung zurückgestellt wurde, so dass die abzuschaltende Maschine bei Entlastung wegen zu grosser Füllung voran zu eilen suchte und dadurch die wattlose Stromstärke erzeugte.

XI. Ueber Wechselstrombogenlampen.

Es ist eine weit verbreitete Ansicht, dass Wechselstrombogenlampen bedeutend weniger Licht geben wie Gleichstrombogenlampen. Dies trifft zu, wenn man gleiche Stromstärken, nicht gleiche Wattzahlen zur Basis des Vergleiches heranzieht; denn die Gleichstrombogenlampe braucht ca. 45 Volt, hingegen die Wechselstromlampe von 28 bis 34, so dass z. B. eine 9 Ampère Gleichstrombogenlampe im Energieverbrauch einer ca. 14 Ampère Wechselstromlampe entspricht.

Bei diesem Stromverhältnisse ist ein wesentlicher Unterschied nicht mehr vorhanden, vorausgesetzt, dass die Wechselstrombogenlampe in allen Teilen richtig konstruiert ist.

Warum die Wechselstromspannung von 28 bis 34 Volt schwankt, hat seinen Grund erstens in der Kurvenform, indem die Spannung bei spitzer Form für gleiche Lichtbogenlänge um 2 bis 3 Volt geringer ist, als bei flacher und zweitens in der Kohlenstiftlänge. Bei einer Länge für 17stündige Brenndauer macht der Verlust in der Kohle ca. 2 Volt aus. Dies erklärt auch, warum der Lichtbogen derartiger Lampen bei fast abgebrannten Kohlenstiften wesentlich grösser ist.

Dass es Bogenlampen gibt, die für beide Stromarten ohne weiteres passen, ist ein Irrtum. Gemeinsam bleibt meist nur der Regulator. Hingegen ist die Spulenwickelung wegen der geringen Spannung der Wechselstrombogenlampe und der Selbstinduktion ganz verschieden, und die Spulenhülsen sind bei Wechselstrom aufgeschlitzt. Um die Vibrationen und das Geräusch zu vermeiden, hängt der obere Kohlenhalter auf Schnüren, auch sind dämpfende Zwischenlagen hier und da vorhanden.

Dicht über dem Lichtbogen befindet sich ein Emailereflektor. Die Kohlen müssen der Stromstärke angepasst sein; zu starke Kohlenstifte, die bei einer bestimmten Stromstärke nicht mehr in Weissglut kommen, geben verhältnismässig wenig Licht ab.

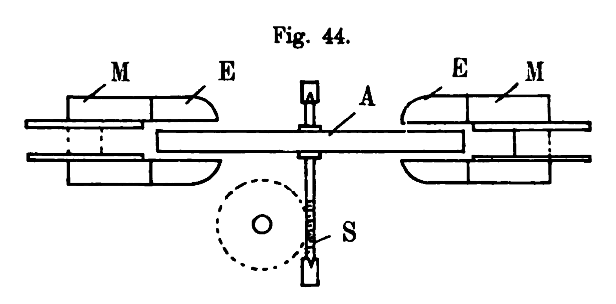
Es gibt jedoch eine Art Wechselstrombogenlampen, die speciell nur für Wechselstrom verwendbar sind.

Die erste derartige Lampe hat wohl die Elektrizitäts-Aktiengesellschaft Schuckert in den Handel gebracht. Dieselbe beruht auf Erscheinungen die Thompson bei seinen Versuchen gefunden hat. Die Anordnung ist in der Fig. 44 schematisch dargestellt.

Die Hauptbestandteile daselbst sind M lamellierte Magnete,

E massiveiserne Polschuhe, die bei b an M angesetzt sind und A eine kupferne Scheibe. Da die Kraftlinien im massiven Eisen E verzögert werden, entstehen zweiphasige Kraftlinien, die ein lebhaftes Drehen der Kupferscheibe A zur Folge haben. Diese Bewegung wird in bekannter Weise durch eine Schnecke S zur Regulierung des Lichtbogens übertragen. Die Scheibe läuft nach links oder rechts um, je

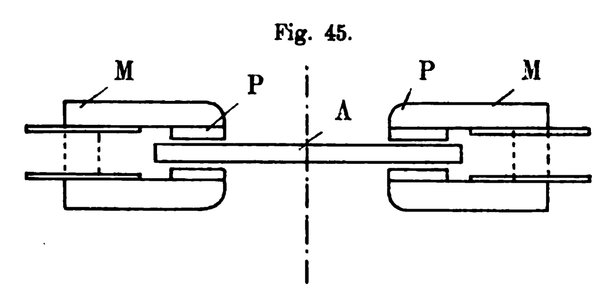
Fig. 44.



nachdem die Wirkung des linken oder rechten bezw. des Nebenschluss- oder Hauptstrommagneten überwiegt.

Auf ähnlichem Prinzipe beruht die Wirkung der von **Benischke** für die Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft hergestellten Lampe (Fig. 45). Es sind wieder zwei Magnete M und eine Kupferscheibe A vorhanden. Die Magnete haben jedoch keine Polschuhe, sondern es ist zwischen

Fig. 45.



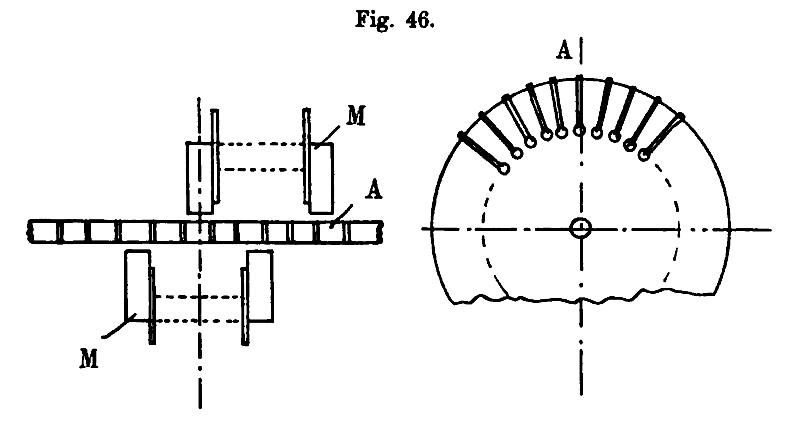
Magnet und A eine Metallplatte M eingeschoben. Die Wirkung soll auf Anziehung beruhen, indem die in den Platten und der Scheibe induzierten Ströme gleich gerichtet sind und sich anziehen, vergl. E. T. Z. 1899, Heft 4.

Einige Jahre vorher wurde der Aktiengesellschaft Elektrizitätswerke eine von mir angegebene Bogenlampe patentiert, wie sie die Fig. 46 darstellt.

Die Hauptbestandteile sind: die Magnete M, die Metallscheibe A aus Eisen mit mehreren kurzgeschlossenen Spulen S. Von den beiden

Magneten ist der eine in den Hauptstrom und der andere in den Nebenschluss eingeschaltet. Letzterer hatte eine grosse Windungszahl, ausserdem wurde ihm eine kleine Induktionsspule J vorgeschaltet.

Fig. 46.



Dieser Magnet hat nun eine, gegenüber dem im Hauptstrom befindlichen, bedeutende Phasenverschiebung.

Man hat jetzt nur nötig die Magnete zu beiden Seiten des Ankers zweiphasig anzuordnen, um eine kräftige Drehung zu erzielen.

XII. Ein induktionsfreies Wechselstromfeld.

Wie bereits erwähnt, zeigen die Wechselstrommotore mit Kollektor grosse Funkenbildung an demselben, welche hauptsächlich von der Wechselinduktion des Ständers auf den Läufer herrührt. Diese Induktion ist unabhängig von der Bewegung, also bei Stillstand ebenso gross wie beim Laufen des Motors und ähnlich der Wirkung des Transformators von Primär auf Sekundär. An der Stelle, wo die Bürsten aufliegen, ist sie am grössten, so dass bei dem Bürstenkurzschluss grosse Ströme entstehen, welche die Funkenbildung verursachen.

Durch eine eigentümliche Wickelungsanordnung nach Fig. 47, 48 und 49 wird diese schädliche Induktion aufgehoben. Jene besteht in der Hauptsache darin, dass nach Fig. 47 ein Ständer mit einer zweipoligen Wickelung B versehen wird, wovon beide Spulen auf N-Pole geschaltet sind, und dass zu dieser eine zweite zweipolige Wickelung A — beide Spulen auf S-Pole geschaltet —, gegen B um 180° gedreht, aufgebracht wird. Die Wickelung B erzeugt Kraftlinien N, die sowohl aus der Fläche BG als auch aus CF heraustreten, so dass die Folgepole s entstehen. Die Wickelung A hingegen

erzeugt die Linien, die in die Ebene A D und E H hineinstreben und die Folgepole n bilden. Legt man die Fig. 49 auf Fig. 48, wie es der Wirklichkeit entspricht, so laufen die Linien der Flächen A D von

Fig. 47.

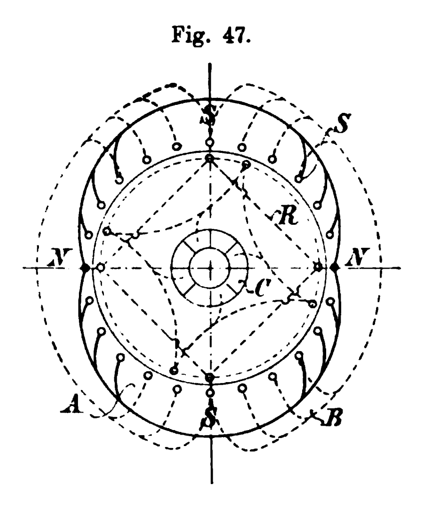
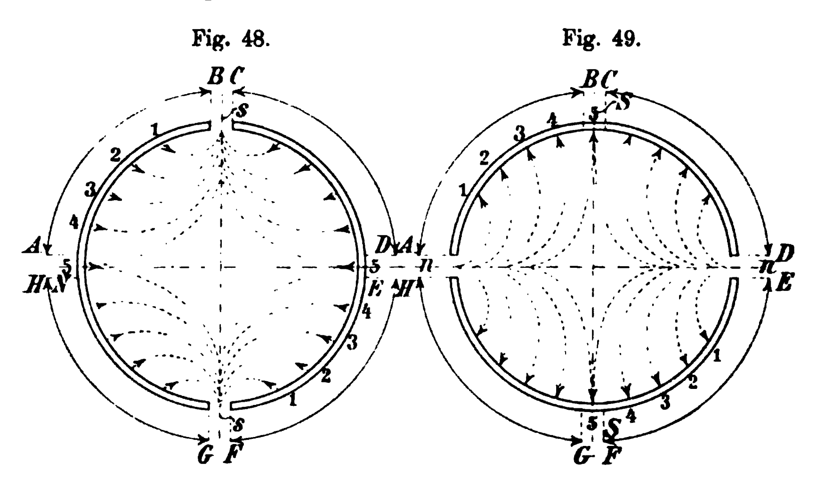


Fig. 48 jenen der Fig. 49 entgegen, ebenso die der Flächen H E, so dass diese Flächen induktionsfrei werden. Es bleiben nur die Folgepole n s, n s übrig. Thatsächlich wird, wie die Versuche ergeben

Fig. 48. Fig. 49.



haben, in der vierpoligen Läuferwickelung R (Fig. 47) bei Stillstand kein Strom induziert, sondern erst bei Bewegung. Die Spannung steigt, wie bei Gleichstrom, mit zunehmender Geschwindigkeit allmählich an.

Beitrag zur Theorie und Untersuchung von mehrphasigen Asynchronmotoren.

Von

O. S. Bragstad,

Karlsruhe, Elektrotechnisches Institut der technischen Hochschule.

Mit 35 Abbildungen.

I. Ueber die Form des Feldes in den asynchronen Maschinen.

1. Einleitung.

Bei den meisten Rechnungen über asynchrone Maschinen geht man von der Annahme aus, dass sich die Feldstärke längs dem Ankerumfang in jedem Moment räumlich nach einem Sinusgesetz ändert. Die zeitliche Aenderung des Feldes in irgend einem Punkte des Ankerumfanges wird ebenfalls sinusförmig angenommen, und zwar so, dass für zwei verschiedene Punkte am Umfange die zeitliche Variation mit einer Phasenverschiebung erfolgt, die der räumlichen Entfernung der beiden Punkte entspricht. Man bekommt somit das Feld als eine am Ankerumfang mit gleichmässiger Geschwindigkeit fortschreitende reine Sinuswelle.

Ein derartiges fortschreitendes Sinusfeld, reines Drehfeld, kann man sich entstanden denken aus einer Anzahl p im Raume feststehender, aber zeitlich nach einem Sinusgesetz variierender Sinusfelder, deren räumliche Verschiebung $\frac{1}{p}$ mal der Wellenlänge des Feldes ist, während die Phasenverschiebung ihrer zeitlichen Variation $\frac{2\pi}{p}$ beträgt.

Setzen wir z. B. $p = 3$ und bezeichne T die Schwingungsdauer der zeitlichen Variation und X die Wellenlänge der Felder, so sind in irgend einem Punkte x des Ankerumfanges zu irgend einem Zeitmomente t die drei Feldstärken gegeben durch die drei Gleichungen:

$$y_1 = Y_1 \cos \frac{2\pi}{X} x,$$

$$y_2 = Y_2 \cos \frac{2\pi}{X} \left(x - \frac{1}{3} X\right),$$

$$y_3 = Y_3 \cos \frac{2\pi}{X} \left(x - \frac{2}{3} X\right),$$

wo Y_1, Y_2 und Y_3 die in dem betrachteten Moment vorhandenen Maximalwerte der drei Felder sind. Diese drei Maximalwerte ändern sich nun zeitlich nach dem folgenden Gesetz:

$$Y_1 = Y \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

$$Y_2 = Y \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{1}{3} T\right),$$

$$Y_3 = Y \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{2}{3} T\right),$$

wobei Y den für alle Felder gleich grossen, überhaupt vorkommenden Maximalwert (Amplitude) bedeutet. Setzen wir die Werte aus den drei letzten Gleichungen in die drei vorhergehenden ein, so bekommen wir:

$$y_1 = Y \sin \frac{2\pi}{T} t \cos \frac{2\pi}{X} x,$$

$$y_2 = Y \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{1}{3} T\right) \cos \frac{2\pi}{X} \left(x - \frac{1}{3} X\right),$$

$$y_3 = Y \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{2}{3} T\right) \cos \frac{2\pi}{X} \left(x - \frac{2}{3} X\right),$$

was in der Form geschrieben werden kann:

$$y_1 = \frac{1}{2} Y \left[\sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{X}\right) + \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{X}\right)\right],$$

$$y_2 = \frac{1}{2} Y \left[\sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{X} - \frac{2}{3}\right) + \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{X}\right)\right],$$

$$y_3 = \frac{1}{2} Y \left[\sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{X} - \frac{4}{3}\right) + \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{X}\right)\right],$$

indem man die Formel benutzt:

$$\sin \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\sin (\alpha + \beta) + \sin (\alpha - \beta)].$$

Die resultierende Feldstärke in einem beliebigen Punkte x am Umfang zur Zeit t ist gleich der Summe der drei Feldstärken y_1, y_2 und y_3, also:

$$y = y_1 + y_2 + y_3 = \frac{3}{2} Y \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{X}\right) \quad . \quad . \quad . \quad \text{I.}$$

Dies ist die Gleichung des am Eingang besprochenen sinusförmigen Drehfeldes. Man sieht, dass sowohl die zeitliche Variation desselben bei konstantem x wie seine räumliche Variation bei konstantem t von Sinusform ist.

Die in der Praxis verwendeten Drehfelder werden erhalten, indem man ein- oder mehrphasige Wechselströme durch am Ankerumfange angebrachte Spulen leitet, welche räumlich in Bezug auf die Wellenlänge des Drehfeldes dieselbe Verschiebung haben wie die Ströme zeitlich in Bezug auf ihre Periode. Bei dieser Erzeugungsart kann nicht, wie in dem betrachteten idealen Fall, ein Sinusfeld erhalten werden; denn erstens ist die räumliche Variation des Feldes einer Spule keine Sinusfunktion, sondern eine von der Form der Spule abhängige Funktion, und zweitens ist auch nicht die zeitliche Variation des Feldes in jedem Punkt des Umfanges von Sinusform; denn das Feld variiert mit dem Wechselstrom der Spule, und derselbe kann eine beliebige Form haben.

Eine Kurve, welche in jedem Moment die magnetomotorische Kraft einer Spule als Funktion des Ankerumfanges darstellt, soll im folgenden mit dem Namen Polkurve bezeichnet werden. Eine Kurve, welche den Wechselstrom einer Spule als Funktion der Zeit darstellt, nennt man gewöhnlich eine Stromkurve. Die im folgenden zu behandelnde Aufgabe besteht nun darin, den Einfluss der Form der Polkurve und der Stromkurve auf das resultierende Drehfeld zu untersuchen. Um die Rechnung zu vereinfachen, setzen wir den magnetischen Widerstand des Eisens der Maschine gleich 0; ferner setzen wir den magnetischen Widerstand im Luftraume in allen Punkten des Umfanges gleich, vernachlässigen also den Einfluss der Oeffnungen der Nuten. Indem wir diese Vereinfachungen machen, die übrigens bei der gewöhnlichen Ausführung der asynchronen Maschinen keinen grossen Fehler ergeben, können wir in jedem Punkt des Ankerumfanges das Feld mit der M.M.K. proportional setzen.

Für die folgende Untersuchung nehmen wir, wie üblich, sogenannte breite oder gekreuzte Spulen an, d. h. Spulen, deren Breite eine halbe Polteilung ist.

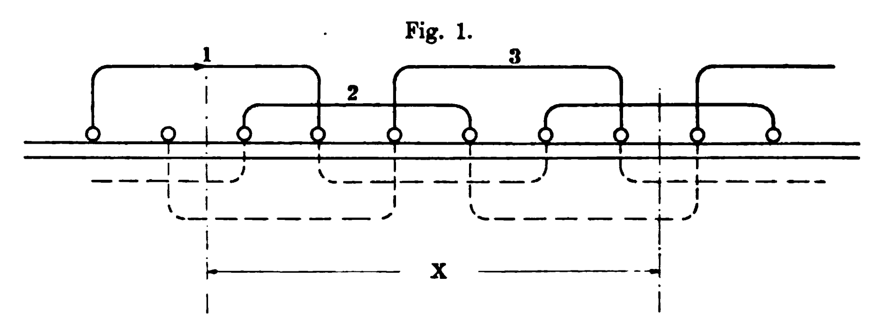
2. Einfluss der Formen der Pol- und Stromkurve auf das erzeugte Drehfeld.

Nach dem Fourierschen Satze kann eine beliebige periodische Polkurve als Funktion von dem Ankerumfange x in der folgenden Reihe entwickelt werden:

$$y_1 = Y_1 \cos \frac{2\pi}{X}(x - \chi_1) + Y_2 \cos 2 \frac{2\pi}{X}(x - \chi_2) + \dots$$
$$+ Y_m \cos m \frac{2\pi}{X} x.$$

Hierbei sind Y_1, Y_2 u. s. w. die für den betrachteten Zeitpunkt geltenden Maximalwerte der einzelnen Harmonischen der Polkurve; χ_1, χ_2 u. s. w. sind die räumlichen Verschiebungen der einzelnen Harmonischen in Bezug auf den gewählten Anfangspunkt $x = 0$. Um

Fig. 1.



die Schreibweise der Gleichungen zu vereinfachen, wählen wir diesen Anfangspunkt so, dass $\chi_m = 0$ wird. Ist die Zahl der Phasen gleich p, so haben wir für je eine Wellenlänge X auf dem Ankerumfange p solcher Polkurven, die um die Strecke $\frac{X}{p}$ gegeneinander verschoben sind, und für jede Polkurve eine Spule, wie Fig. 1 für ein Dreiphasensystem zeigt.

Die Gleichungen der p Polkurven eines p-Phasensystems lauten nun:

$$y_1 = \Sigma Y_{m_1} \cos m \frac{2\pi}{X} x,$$

$$y_2 = \Sigma Y_{m_2} \cos m \frac{2\pi}{X}\left(x - \frac{1}{p} X\right),$$

. . . .

$$y_p = \Sigma Y_{m_p} \cos m \frac{2\pi}{X}\left(x - \frac{p-1}{p} X\right).$$

Hierbei ist die Summation auszuführen über m von 1 bis ∞. Y_{m_1}, Y_{m_2} u. s. w. sind die in dem betrachteten Momente vorhandenen Maximalwerte der m^{ten} Harmonischen der p Polkurven. Weil die p Polkurven von p Wechselströmen, die um $\frac{2\pi}{p}$ verschoben sind, erzeugt werden, so können wir die Maximalwerte schreiben, indem wir die Gleichungen der p Wechselströme in Fouriersche Reihen auflösen:

$$Y_{m_1} = C_m i_1 = \Sigma Y_{nm} \sin n \frac{2\pi}{T} t,$$

$$Y_{m_2} = C_m i_2 = \Sigma Y_{nm} \sin n \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{1}{p} T\right),$$

. . . .

$$Y_{m_p} = C_m i_p = \Sigma Y_{nm} \sin n \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{p-1}{p} T\right).$$

Hierin bedeutet Y_{nm} die überhaupt vorkommende Amplitude derjenigen Welle des Feldes, welche durch Zusammenwirken der m^{ten} Harmonischen der Polkurve mit der n^{ten} Harmonischen der Stromkurve entsteht. Der Anfangspunkt der Zeit t ist so gewählt, dass die n^{te} Stromharmonische der Phase 1 zur Zeit Null durch Null geht. Führen wir die Werte von Y_{m_1}, Y_{m_2} u. s. w. aus den letzten Gleichungen in die vorletzten ein, so bekommen wir die Ordinaten der p Polkurven als Funktion des Umfanges x und der Zeit t durch die folgenden Gleichungen dargestellt:

$$y_1 = \Sigma\, \Sigma Y_{nm} \sin n \frac{2\pi}{T} t \cos m \frac{2\pi}{X} x,$$

$$y_2 = \Sigma\, \Sigma Y_{nm} \sin n \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{1}{p} T\right) \cos m \frac{2\pi}{X} \left(x - \frac{1}{p} X\right),$$

. . . .

$$y_p = \Sigma\, \Sigma Y_{nm} \sin n \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{p-1}{p} T\right) \cos m \frac{2\pi}{X} \left(x - \frac{p-1}{p} X\right).$$

Die für jede Polkurve auftretende Doppelsumme ist zu bilden einmal nach den Harmonischen der Stromkurve (n) und das andere Mal nach den Harmonischen der Polkurve (m). Wir betrachten nun diejenigen höheren Wellen der Polkurven, welche durch das Zusammenwirken der n^{ten} Harmonischen der Stromkurven mit den m^{ten} Harmonischen der Polkurven entstehen. Diese sind:

$$y_{n m_1} = Y_{n m} \sin n \frac{2\pi}{T} t \cos m \frac{2\pi}{X} x,$$

$$y_{n m_2} = Y_{n m} \sin n \frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{1}{p} T\right) \cos m \frac{2\pi}{X}\left(x - \frac{1}{p} X\right),$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$y_{n m_p} = Y_{n m} \sin n \frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{p-1}{p} T\right) \cos m \frac{2\pi}{X}\left(x - \frac{p-1}{p} X\right).$$

Unter Benutzung der früher angegebenen Umformung:

$$\sin \alpha \cos \beta = \frac{1}{2}\left[\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha + \beta)\right]$$

können wir diese Gleichungen schreiben:

$$y_{n m_1} = \frac{1}{2} Y_{n m}\left[\sin 2\pi\left(\frac{n t}{T} + \frac{m x}{X}\right) + \sin 2\pi\left(\frac{n t}{T} - \frac{m x}{X}\right)\right],$$

$$y_{n m_2} = \frac{1}{2} Y_{n m}\left[\sin 2\pi\left(\frac{n t}{T} + \frac{m x}{X} - \frac{1}{p}(n + m)\right)\right.$$
$$\left. + \sin 2\pi\left(\frac{n t}{T} - \frac{m x}{X} - \frac{1}{p}(n - m)\right)\right],$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$y_{n m_p} = \frac{1}{2} Y_{n m}\left[\sin 2\pi\left(\frac{n t}{T} + \frac{m x}{X} - \frac{p-1}{p}(n + m)\right)\right.$$
$$\left. + \sin 2\pi\left(\frac{n t}{T} - \frac{m x}{X} - \frac{p-1}{p}(n - m)\right)\right].$$

Um die entsprechende Harmonische der resultierenden Feldkurven zu erhalten, haben wir in jedem Punkt des Ankerumfanges diese p n m^ten Harmonischen der p Polkurven zu addieren. Bezeichnen wir also die Ordinaten dieser n m^ten Harmonischen der resultierenden Feldkurve mit $y_{n m}$, so ist:

$$y_{n m} = y_{n m_1} + y_{n m_2} + \cdots + y_{n m_p}.$$

Bei dieser Summation treten die folgenden Spezialfälle auf:

Fall 1. $n + m$ und $n - m$ seien beide nicht durch p teilbar: die Division ergebe in beiden Fällen eine positive oder negative ganze Zahl oder 0 plus einen positiven oder negativen Rest. Der Rest sei bezw. durch r_1 und r_2 bezeichnet. Bilden wir nun in dem Gleichungssystem für $y_{n m_1}$, $y_{n m_2}$ u. s. w. die Summe der in der ersten Reihe stehenden Sinus, so bekommen wir:

$$\sin 2\pi\left(\frac{nt}{T}+\frac{mx}{X}\right)+\sin 2\pi\left(\frac{nt}{T}+\frac{mx}{X}-\frac{r_1}{p}\right)+\ldots$$
$$\ldots+\sin 2\pi\left(\frac{nt}{T}+\frac{mx}{X}-(p-1)\frac{r_1}{p}\right).$$

Wir multiplizieren diese Summe mit

$$\sin 2\pi\frac{r_1}{2p}$$

und schreiben sie:

$$\frac{1}{2}\left[-\cos 2\pi\left(\frac{nt}{T}+\frac{mx}{X}+\frac{r_1}{2p}\right)+\cos 2\pi\left(\frac{nt}{T}+\frac{mx}{X}-\frac{r_1}{2p}\right)\right.$$
$$\left.-\cos 2\pi\left(\frac{nt}{T}+\frac{mx}{X}-\frac{r_1}{2p}\right)\pm\ldots+\cos 2\pi\left(\frac{nt}{T}+\frac{mx}{X}-r_1+\frac{r_1}{2p}\right)\right].$$

Diese Summe ist 0. Ebenso beweist man, dass die Summe der in der zweiten Reihe desselben Gleichungssystems stehenden Sinus gleich 0 wird. Wir bekommen hieraus den folgenden Satz:

In einem p-Phasensystem erzeugt die n^{te} Harmonische des Stromes mit der m^{ten} Harmonischen der Polkurve keine nm^{te} Harmonische in der resultierenden Feldkurve, wenn $n+m$ und $n-m$ beide nicht durch p teilbar sind.

Fall 2. $n-m$ sei durch p teilbar, aber nicht $n+m$. Wie im Fall 1 ist dann die Summe der in der ersten Reihe stehenden Sinus gleich 0. Die Summe der Sinus in der zweiten Reihe ist aber:

$$p\sin 2\pi\left(\frac{nt}{T}-\frac{mx}{X}\right).$$

Für diesen Fall ist also:

$$y_{nm}=\frac{p}{2}Y_{nm}\sin 2\pi\left(\frac{nt}{T}-\frac{mx}{X}\right).$$

Durch Vergleich mit der in der Einleitung gegebenen Gleichung sehen wir, dass dies ein reines Drehfeld darstellt von der Amplitude $\frac{p}{2}Y_{nm}$, der Periode $\frac{T}{n}$ und von der Wellenlänge $\frac{X}{m}$.

Mit Ausnahme des Ein- und Zweiphasensystems ($p=1$ und $p=2$) kommt immer die erste Harmonische des resultierenden Drehfeldes unter diesen Fall; denn diese Harmonische wird gebildet durch das Zusammenwirken der ersten Harmonischen der Stromkurve mit der ersten Harmonischen der Polkurve, sie wird also erhalten, wenn man $n=m=1$ setzt, so dass $\frac{n-m}{p}=0$ wird, was der obigen Bedingung

entspricht. Die Gleichung für diese Grundwelle des rotierenden Feldes ist somit:

$$y_{11} = \frac{p}{2} Y_{11} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{X}\right).$$

Hieraus finden wir den folgenden Satz:

In einem p-Phasensystem erzeugt die n^{te} Harmonische des Stromes mit der m^{ten} Harmonischen der Polkurve eine nm^{te} Harmonische in der resultierenden Feldkurve, sobald $n-m$ durch p teilbar und $n+m$ nicht durch p teilbar ist. Die Rotationsrichtung dieser Harmonischen ist dieselbe wie die des Grundfeldes; aber ihre Periodenzahl ist das n-fache und ihre Polzahl das m-fache von demjenigen des Grundfeldes.

Fall 3. $n-m$ sei nicht durch p teilbar, sondern $n+m$. Wie im Fall 1 ist die Summe der in der zweiten Reihe der Gleichungen für y_{nm_1}, y_{nm_2} u. s. w. stehenden Sinus gleich 0. Die Summe der Sinus in der ersten Reihe ist:

$$p \sin 2\pi \left(\frac{nt}{T} + \frac{mx}{X}\right)$$

und

$$y_{nm} = \frac{p}{2} Y_{nm} \sin 2\pi \left(\frac{nt}{T} + \frac{mx}{X}\right).$$

Hieraus sieht man, dass diese Harmonischen der resultierenden Feldkurve die umgekehrte Drehrichtung der im zweiten Falle behandelten Harmonischen haben. Diese Wellen bewegen sich also auch in der entgegengesetzten Richtung zu der Grundwelle des Feldes.

In einem p-Phasensystem erzeugt die n^{te} Harmonische des Stromes mit der m^{ten} Harmonischen der Polkurve eine nm^{te} Harmonische in der resultierenden Feldkurve, sobald $n+m$ durch p teilbar und $n-m$ nicht durch p teilbar ist. Die Rotationsrichtung dieser Harmonischen ist derjenigen des Grundfeldes entgegengesetzt; ihre Periodenzahl ist das n-fache und ihre Polzahl das m-fache von demjenigen des Grundfeldes.

Fall 4. $n-m$ und $n+m$ seien beide durch p teilbar. Damit dies der Fall sein soll, müssen bei ungerader Phasenzahl p n und m für sich durch p teilbar sein. Für diesen Fall ist

$$y_{nm} = \frac{p}{2} Y_{nm} \left[\sin 2\pi \left(\frac{nt}{T} + \frac{mx}{X}\right) + \sin 2\pi \left(\frac{nt}{T} - \frac{mx}{X}\right)\right].$$

Dies sind zwei harmonische Drehfelder von gleicher Amplitude, Periode und Wellenlänge, die in entgegengesetzter Richtung rotieren. Aus denselben resultiert ein stehendes oder pulsierendes Feld.

In einem p-Phasensystem erzeugt die n^{te} Harmonische des Stromes mit der m^{ten} Harmonischen der Polkurve zwei gleiche, aber entgegengesetzt rotierende Harmonische in der resultierenden Feldkurve, sobald $n - m$ und $n + m$ beide durch p teilbar sind. Diese beiden Felder sind in der Wirkung gleichwertig mit einem stehenden oder pulsierenden Feld von der doppelten Amplitude.

Beim Ein- und Zweiphasensystem ($p = 1$ und $p = 2$) ist diese Bedingung für die Grundschwingung des Stromes und der Polkurve erfüllt ($n = 1$ und $m = 1$). Bei diesen Systemen ist deshalb das Grundfeld ein pulsierendes Feld.

Hier sei noch an die folgende Regel erinnert:

In einem symmetrischen p-Phasensystem ohne neutralen Leiter können n^{te} Harmonische, für welche n durch p teilbar ist, in der Stromkurve nicht auftreten.

Für gewöhnlich können ferner aus Symmetriegründen weder in den Strom- noch in den Polkurven Harmonische n und m auftreten, für welche n resp. m durch 2 teilbar ist.

Wir können die Ergebnisse wie folgt zusammenfassen, indem wir die erste Harmonische der resultierenden Feldkurve als rechtsrotierend annehmen:

In einem p-Phasensystem entsteht

kein Feld,	wenn	$\frac{n+m}{p}$	und	$\frac{n-m}{p}$	unteilbar,
rechtsrotierendes Feld,	„			$\frac{n-m}{p}$	teilbar,
linksrotierendes Feld,	„	$\frac{n+m}{p}$			teilbar,
pulsierendes Feld,	„	$\frac{n+m}{p}$	und	$\frac{n-m}{p}$	teilbar.

Hierin sind die vier möglichen Fälle enthalten.

Wir erkennen nun, dass ein Drehfeld, wie es in der Praxis vorkommt, aus einem sinusartigen Grundfeld mit einer unendlichen Anzahl von harmonischen Sinusfeldern höherer Ordnung besteht. Die Polzahlen dieser Felder sind 1-, 3-, 5- . . . m-mal der Polzahl des Grundfeldes, und die Periodenzahlen derselben sind 1-, 3-, 5- . . . n-mal

der Periodenzahl des Grundfeldes. Die hieraus sich ergebenden verschiedenen Rotationsgeschwindigkeiten der einzelnen Harmonischen können positiv, negativ oder Null sein; im letzteren Falle hat man stehende oder pulsierende höhere Harmonische.

Diese Vorstellung, die auf den ersten Blick als eine Komplikation erscheint, wird uns, wie später gezeigt werden soll, zu einem besseren Verständnis der Vorgänge in den asynchronen Maschinen verhelfen.

Betrachten wir nun von diesem Gesichtspunkte aus die gewöhnlichsten Mehrphasensysteme, indem wir mit dem Einphasensystem anfangen.

Einphasensystem, $p = 1$.

Bei diesem System sind immer $n + m$ und $n - m$ durch p teilbar. In demselben können demnach alle höheren Harmonischen in der resultierenden Feldkurve auftreten, und zwar geben dieselben alle stehende und pulsierende Felder. Die Regel, dass durch p teilbare höhere Harmonische der Stromkurve nicht ohne Neutralleitung auftreten können, ergiebt, dass in einem Einphasensystem ohne Neutralleitung keine Harmonische, also überhaupt kein Strom, auftreten kann. Ein solches System wäre deshalb undenkbar. Bei dem gewöhnlichen Einphasensystem muss man sich deswegen den einen Aussenleiter von dem einen Endpunkte der Phase als die „neutrale" Leitung vorstellen. In einem solchen System können auch gerade Harmonische in der Stromkurve auftreten und ebenfalls pulsierende Felder erzeugen.

Zweiphasensystem, $p = 2$.

$n + m$ und $n - m$ (m ungerade) sind entweder beide durch 2 teilbar oder beide durch 2 unteilbar. Die Harmonischen der Stromkurve erzeugen also entweder pulsierende oder gar keine Harmonischen im resultierenden Feld; die pulsierenden Feldharmonischen werden von den ungeraden Stromharmonischen erzeugt, während die geraden Stromharmonischen kein Feld hervorbringen. Die letzteren Stromharmonischen können nur bei Vorhandensein eines neutralen Leiters auftreten.

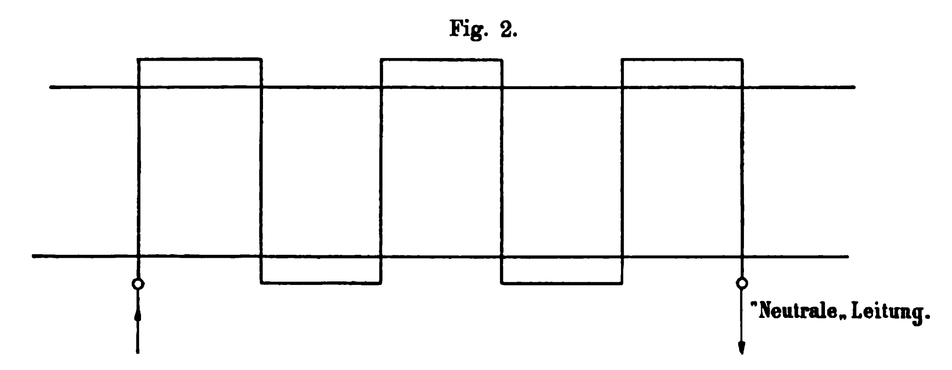
Der Unterschied zwischen einer einphasigen und einer zweiphasigen Wickelung geht deutlich aus den Fig. 2 und 3 hervor. In Fig. 3 ist Phase 1 voll und Phase 2 punktiert gezeichnet.

Dreiphasensystem, $p = 3$.

Die Verhältnisse bei diesem System sind in der nachstehenden Tabelle schematisch dargestellt. In der Horizontalreihe stehen die

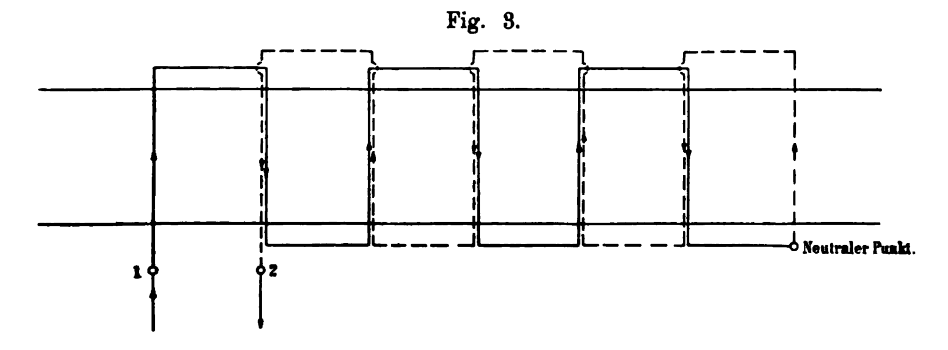
Perioden- und Schwingungszahlen der einzelnen Stromharmonischen und in der Vertikalreihe die Wellenlängen und die Polzahlen der Harmonischen der Polkurven. Die entstehenden Harmonischen des resultierenden Feldes sind durch Kreise und ihre Rotationsrichtung durch Pfeile angedeutet. Doppelfelder oder pulsierende Felder werden

Fig. 2.



nur von den durch 3 teilbaren höheren Harmonischen des Stromes und der Polkurve erzeugt. Ohne Neutralleitung können diese Felder deswegen im Dreiphasensystem nicht vorkommen. Schliesst man noch die geraden Harmonischen aus, so treten nur Drehfelder von 1-, 5-, 7-, 11-, 13-, 17- u. s. w. -facher Periodenzahl und 1-, 5-, 7-, 11-, 13-,

Fig. 3.



17- u. s. w. -facher Polzahl auf. Die Drehrichtung dieser Felder ist abwechselnd nach rechts und nach links. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit eines n m^ten Feldes im Verhältnis zum Hauptfelde ist $\frac{n}{m}$; sie ist also gleich derjenigen des Hauptfeldes für $n = m$, und grösser oder kleiner als diejenige des Hauptfeldes, je nachdem n grösser oder kleiner als m ist.

Uebersicht über die Harmonischen in dem Drehfelde eines Dreiphasensystems.

Periode.		T	$\frac{T}{2}$	$\frac{T}{3}$	$\frac{T}{4}$	$\frac{T}{5}$	$\frac{T}{6}$	$\frac{T}{7}$	$\frac{T}{8}$	$\frac{T}{9}$	$\frac{T}{10}$	$\frac{T}{11}$	$\frac{T}{12}$	$\frac{T}{13}$
Wellen-länge.	n-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
X	m 1	○	○		○	○		○	○		○	○		○
$\frac{X}{3}$	3			○			○			○			○	
$\frac{X}{5}$	5	○	○		○	○		○	○		○	○		○
$\frac{X}{7}$	7	○	○		○	○		○	○		○	○		○
$\frac{X}{9}$	9			○			○			○			○	
$\frac{X}{11}$	11	○	○		○	○		○	○		○	○		○
$\frac{X}{13}$	13	○	○		○	○		○	○		○	○		○
$\frac{X}{15}$	15			○			○			○			○	
$\frac{X}{17}$	17	○	○		○	○		○	○		○	○		○
$\frac{X}{19}$	19	○	○		○	○		○	○		○	○		○
$\frac{X}{21}$	21			○			○			○			○	
$\frac{X}{23}$	23	○	○		○	○		○	○		○	○		○

Bei dem Dreiphasensystem fallen verhältnismässig viele von den höheren Harmonischen der resultierenden Feldkurve weg, nämlich zunächst die geraden und dann die durch 3 teilbaren. Diese Eigenschaft, welche dem Dreiphasensystem zukommt, weil es unter den Mehrphasensystemen die niedrigste ungerade Phasenzahl hat, macht dies System für viele Zwecke besonders geeignet, wie später genauer gezeigt werden soll.

Vierphasensystem, $p = 4$.

Sind sowohl n wie m ungerade, so ist von den Zahlen $n + m$ und $n - m$ die eine immer durch 4 teilbar und die andere unteilbar. Es kommen deshalb in dem Drehfeld des Vierphasensystems alle ungeraden Harmonischen vor, und zwar sind dieselben alle Drehfelder mit Drehungssinn abwechselnd positiv und negativ. Gerade Harmonische der Stromkurve mit ungeraden Harmonischen der Polkurve erzeugen keine Harmonische in der resultierenden Feldkurve.

Für die Ableitung der Bedingungsgleichung am Anfang dieses Abschnittes haben wir festgesetzt, dass die räumliche Verschiebung der Spulen in einem p-Phasensystem gleich $\frac{2\pi}{p}$ sein soll. In einem Vierphasensystem muss dieselbe also 90^{0} betragen. Bezeichnen wir

Uebersicht über die Harmonischen in dem Drehfelde eines symmetrischen Vierphasensystems.

Periode.		T	$\frac{T}{2}$	$\frac{T}{3}$	$\frac{T}{4}$	$\frac{T}{5}$	$\frac{T}{6}$	$\frac{T}{7}$	$\frac{T}{8}$	$\frac{T}{9}$	$\frac{T}{10}$	$\frac{T}{11}$	$\frac{T}{12}$	$\frac{T}{13}$
Wellen-länge	n·	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
X	m 1	○		○		○		○		○		○		○
$\frac{X}{3}$	3	○		○		○		○		○		○		○
$\frac{X}{5}$	5	○		○		○		○		○		○		○
$\frac{X}{7}$	7	○		○		○		○		○		○		○
$\frac{X}{9}$	9	○		○		○		○		○		○		○
$\frac{X}{11}$	11	○		○		○		○		○		○		○
$\frac{X}{13}$	13	○		○		○		○		○		○		○
$\frac{X}{15}$	15	○		○		○		○		○		○		○
$\frac{X}{17}$	17	○		○		○		○		○		○		○
$\frac{X}{19}$	19	○		○		○		○		○		○		○
$\frac{X}{21}$	21	○		○		○		○		○		○		○
$\frac{X}{23}$	23	○		○		○		○		○		○		○

die vier Phasen der Reihe nach mit 1, 2, 3 und 4, so ist die Verschiebung zwischen 1 und 3 180°, ebenso diejenige zwischen 2 und 4.

Fig. 4.

Wir bekommen somit das in Fig. 4 dargestellte abgewickelte Wickelungsschema. Dasselbe ist für eine vierpolige Anordnung gezeichnet.

Bei den Mehrphasensystemen mit einer geraden Anzahl von Phasen p kann oft eine Modifikation eintreten, welche darin besteht, dass die Phasenzahl von p zu $\frac{p}{2}$ reduziert wird, während die räumliche Anordnung der Spulen der verbleibenden $\frac{p}{2}$ Phasen bestehen bleibt, so dass die Verschiebung derselben nach wie vor $\frac{2\pi}{p}$ beträgt.

Ein derartiges System tritt z. B. auf, wenn man in einem Vierphasensystem, wie es in Fig. 4 dargestellt ist, die zu Phase 1 und 2 jeweils um 180° verschobenen Phasen 3 und 4 wegnimmt, während die in Fig. 4 markierten Neutralpunkte verbunden oder getrennt bleiben. Im ersteren Falle bekommt man das in der Praxis gebräuchliche sogenannte „verkettete Zweiphasensystem", im letzteren Falle dagegen das „unverkettete Zweiphasensystem".

Bei einem solchen System bekommen wir die n m[ten] Harmonischen der $\frac{p}{2}$, um $\frac{2\pi}{p}$ verschobenen Polkurven als Funktion von Zeit und Raum ähnlich, wie früher, durch die folgenden $\frac{p}{2}$ Gleichungen ausgedrückt.

$$y_{n m_1} = Y_{n m} \sin n \frac{2\pi}{T} t \cos m \frac{2\pi}{X} x,$$

$$y_{n m_2} = Y_{n m} \sin n \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{1}{p} T\right) \cos \frac{2\pi}{X} \left(x - \frac{1}{p} X\right),$$

. . . .

$$y_{n m \frac{p}{2}} = Y_{n m} \sin n \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{\frac{1}{2} p - 1}{p} T\right) \cos \frac{2\pi}{X} \left(x - \frac{\frac{1}{2} p - 1}{p} X\right).$$

Nach entsprechender Umformung hat man wie früher

$$y_{n m_1} = \frac{1}{2} Y_{n m} \left[\sin 2\pi \left(\frac{n t}{T} + \frac{m x}{X}\right) + \sin 2\pi \left(\frac{n t}{T} - \frac{m x}{X}\right)\right],$$

$$y_{n m_2} = \frac{1}{2} Y_{n m} \left[\sin 2\pi \left(\frac{n t}{T} + \frac{m x}{X} - \frac{1}{p}(n + m)\right)\right.$$
$$\left. + \sin 2\pi \left(\frac{n t}{T} - \frac{m x}{X} - \frac{1}{p}(n - m)\right)\right],$$

$$y_{n\,m\,\frac{p}{2}} = \frac{1}{2} Y_{n\,m} \left[\sin 2\pi \left(\frac{n\,t}{T} + \frac{m\,x}{X} - \frac{\frac{1}{2}\,p - 1}{p} (n+m) \right) \right.$$

$$\left. + \sin 2\pi \left(\frac{n\,t}{T} - \frac{m\,x}{X} - \frac{\frac{1}{2}\,p - 1}{p} (n-m) \right) \right].$$

Die Ordinate der entsprechenden Harmonischen in der resultierenden Feldkurve ist:

$$y_{n\,m} = y_{n\,m_1} + y_{n\,m_2} + \ldots + y_{n\,m\,\frac{p}{2}}.$$

Fall 1. $n + m$ und $n - m$ seien beide durch p nicht teilbar. Der Rest sei bezw. r_1 und r_2. Die Summe ist dann:

$$y_{n\,m} = \frac{1}{2} Y_{n\,m} \left\{ \frac{1}{2 \sin 2\pi \frac{r_1}{2\,p}} \left[- \cos 2\pi \left(\frac{n\,t}{T} + \frac{m\,x}{X} + \frac{r_1}{2\,p} \right) \right. \right.$$

$$+ \cos 2\pi \left(\frac{n\,t}{T} + \frac{m\,x}{X} - \frac{r_1}{2\,p} \right) - \cos 2\pi \left(\frac{n\,t}{T} + \frac{m\,x}{X} - \frac{r_1}{2\,p} \right)$$

$$\left. + \ldots + \cos 2\pi \left(\frac{n\,t}{T} + \frac{m\,x}{X} - \frac{r_1}{2} + \frac{r_1}{2\,p} \right) \right]$$

$$+ \frac{1}{2 \sin 2\pi \frac{r_1}{2\,p}} \left[- \cos 2\pi \left(\frac{n\,t}{T} - \frac{m\,x}{X} + \frac{r_2}{2\,p} \right) \right.$$

$$+ \cos 2\pi \left(\frac{n\,t}{T} - \frac{m\,x}{X} - \frac{r_2}{2\,p} \right)$$

$$- \cos 2\pi \left(\frac{n\,t}{T} - \frac{m\,x}{X} - \frac{r_2}{2\,p} \right) + \ldots$$

$$\left. \left. + \cos 2\pi \left(\frac{n\,t}{T} - \frac{m\,x}{X} - \frac{r_2}{2} + \frac{r_2}{2\,p} \right) \right] \right\}.$$

Hier treten die folgenden Unterfälle auf:

Fall 1a. Die Reste r_1 und r_2 seien beide durch 2 teilbar. Die ganze Summe ist Null.

Fall 1b. r_1 teilbar durch 2, r_2 unteilbar durch 2.

$$y_{nm} = -\frac{1}{2} Y_{nm} \frac{1}{\sin 2\pi \frac{r_2}{2p}} \cos 2\pi \left(\frac{nt}{T} - \frac{mx}{X} + \frac{r_2}{2p}\right).$$

Also ein Drehfeld in der Richtung des Hauptfeldes.

Fall 1c. r_1 unteilbar durch 2, r_2 teilbar durch 2.

$$y_{nm} = -\frac{1}{2} Y_{nm} \frac{1}{\sin 2\pi \frac{r_1}{2p}} \cos 2\pi \left(\frac{nt}{T} + \frac{mx}{X} + \frac{r_1}{2p}\right).$$

Das bedeutet ein Drehfeld in entgegengesetzter Richtung des Hauptfeldes.

Fall 1d. r_1 und r_2 unteilbar durch 2.

$$y_{nm} = -\frac{1}{2} Y_{nm} \left[\frac{1}{\sin 2\pi \frac{r_1}{2p}} \cos 2\pi \left(\frac{nt}{T} + \frac{mx}{X} + \frac{r_1}{2p}\right) + \frac{1}{\sin 2\pi \frac{r_2}{2p}} \cos 2\pi \left(\frac{nt}{T} - \frac{mx}{X} + \frac{r_2}{2p}\right)\right].$$

Das bedeutet nach dem Vorherigen zwei in entgegengesetzter Richtung mit gleicher Geschwindigkeit rotierende Felder. Sie können zu einem pulsierenden Feld von einer Amplitude gleich der Summe der Amplituden der beiden Drehfelder zusammengefasst werden. Also von der Amplitude

$$-\frac{1}{2} Y_{nm} \left[\frac{1}{\sin 2\pi \frac{r_1}{2p}} + \frac{1}{\sin 2\pi \frac{r_2}{2p}}\right].$$

Fall 2. $n - m$ sei durch p teilbar, aber nicht $n + m$. Wir haben dann wie unter Fall 2 in dem vorhergehenden Abschnitt unter Berücksichtigung, dass nur $\frac{p}{2}$ Phasen vorhanden sind,

$$y_{nm} = \frac{p}{4} Y_{nm} \sin 2\pi \left(\frac{nt}{T} - \frac{mx}{X}\right).$$

Die zweite Summe verschwindet aber hier nicht immer; sondern sie ist nach einem der Unterfälle im Hauptfalle 1 zu behandeln.

Fall 3. $n + m$ sei durch p teilbar, aber nicht $n - m$.

$$y_{nm} = \frac{p}{4} Y_m \sin 2\pi \left(\frac{nt}{T} + \frac{mx}{X}\right).$$

Die zweite Summe wird erhalten je nach der Grösse des Restes r_2 nach einem der unter Fall 1 behandelten Unterfälle.

Fall 4. $n + m$ und $n - m$ seien beide durch p teilbar; man bekommt das Doppelfeld:

$$y_{nm} = \frac{p}{4} Y_{nm} \left[\sin 2\pi \left(\frac{nt}{T} + \frac{mx}{X}\right) + \sin 2\pi \left(\frac{nt}{T} - \frac{mx}{X}\right)\right].$$

Beispielsweise ist in dem beistehenden Schema eine Zusammenstellung der möglichen Harmonischen in dem Drehfelde eines unsymmetrischen, halbierten Vierphasensystems, also für $p = 4$, gegeben.

Uebersicht über die Harmonischen in dem Drehfelde eines unsymmetrischen, halbierten Vierphasensystems (Zweiphasensystem).

Periode.		T	$\frac{T}{2}$	$\frac{T}{3}$	$\frac{T}{4}$	$\frac{T}{5}$	$\frac{T}{6}$	$\frac{T}{7}$	$\frac{T}{8}$	$\frac{T}{9}$	$\frac{T}{10}$	$\frac{T}{11}$	$\frac{T}{12}$	$\frac{T}{13}$
Wellenlänge.	n =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
X	m 1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
$\frac{X}{3}$	3	○	○	○	○	○	○	○						
$\frac{X}{5}$	5	○	○	○	○	○	○	○						
$\frac{X}{7}$	7	○	○	○	○	○	○	○						
$\frac{X}{9}$	9	○	○	○	○	○	○	○						
$\frac{X}{11}$	11	○	○	○	○									
$\frac{X}{13}$	13	○												
$\frac{X}{15}$	15	○												
$\frac{X}{17}$	17	○												
$\frac{X}{19}$	19	○												
$\frac{X}{21}$	21	○												
$\frac{X}{23}$	23	○												

Nehmen wir z. B. die Grundschwingung von Feld und Strom, so ist $n = m = 1$ zu setzen. $n - m = 0$, also durch 4 teilbar, ergibt ein rechtsdrehendes Feld nach Fall 2:

$$y_{11} = Y_{11} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{X}\right).$$

Die Amplitude der Grundharmonischen des resultierenden Drehfeldes ist somit gleich der Amplitude der betreffenden Harmonischen

in der Polkurve. $n + m$ ist hier durch 2 teilbar, wodurch dies Glied verschwindet nach Fall 1b.

Man findet für dies System immer, wenn n und m ungerade sind, dass von den Zahlen $n + m$ und $n - m$ die eine durch 4 teilbar ist, und dass die andere bei der Division einen Rest gibt, der durch 2 teilbar ist. Somit erhalten wir immer ein rotierendes Feld, während das zweite Glied nach Fall 1b oder 1c verschwindet. Hieraus ergeben sich die abwechselnd nach rechts und links rotierenden Felder in der schematischen Zusammenstellung.

Für alle diese Felder gilt, dass die Amplitude einer Harmonischen in der resultierenden Feldkurve gleich der Amplitude der entsprechenden Harmonischen in der Polkurve ist.

Betrachten wir zweitens die geraden Stromharmonischen, z. B. $n = 2$ und $m = 1$. $n + m$ und $n - m$ geben bei der Division die Reste $r_1 = 3$ und $r_2 = 1$, welche beide nicht durch 2 teilbar sind. Wir haben also den Fall 1d.

$$\sin 2\pi \frac{r_1}{2p} = \sin 2\pi \frac{3}{8} = + \frac{1}{2}\sqrt{2},$$

$$\sin 2\pi \frac{r_2}{2p} = \sin 2\pi \frac{1}{8} = + \frac{1}{2}\sqrt{2}.$$

Hieraus ergeben sich die beiden gegeneinander rotierenden Felder

$$-\frac{1}{2}\sqrt{2}\, Y_{nm} \cos 2\pi \left(\frac{2t}{T} + \frac{x}{X} + \frac{3}{8}\right)$$

und

$$-\frac{1}{2}\sqrt{2}\, Y_{nm} \cos 2\pi \left(\frac{2t}{T} - \frac{x}{X} + \frac{1}{8}\right),$$

welche ersetzt werden können durch ein pulsierendes Feld mit der Amplitude

$$\sqrt{2}\, Y_{nm}.$$

Dies Feld kann man sich wieder ersetzt denken durch zwei räumlich um 90° verschobene pulsierende Felder, welche zeitlich in Phase sind. Die Amplitude dieser pulsierenden Felder ist Y_m. Das ist also die entsprechende Harmonische der Polkurven.

Für die höheren geraden Harmonischen bekommt man analog dem Falle $n = 2$ pulsierende Felder, deren Amplituden im Verhältnis zu denjenigen der entsprechenden Harmonischen der Polkurve dieselben bleiben wie in dem eben betrachteten Falle $n = 2$.

Wir können uns nun den Vorgang im Drehfelde eines unsymmetrischen halbierten Vierphasensystems wie folgt klar machen: Jede Polkurve enthält eine unendliche Reihe von ungeraden Harmonischen m, deren Grössen im wesentlichen durch die Art der Wickelung bestimmt sind, und welche jeweils mit den entsprechenden Harmonischen der benachbarten Polkurve räumlich um 90° verschoben sind. Werden die Pole mittelst eines Zweiphasenstromes erregt, so bringen die ungeraden Harmonischen desselben, welche zeitlich um 90° verschoben sind, die einzelnen Harmonischen der Polkurven zur Rotation, dabei ändern sich ihre Amplituden nicht; die Drehrichtungen und Drehgeschwindigkeiten sind für die verschiedenen Harmonischen verschieden. für die n m^te Harmonische ist die Drehgeschwindigkeit $\frac{n}{m}$ mal derjenigen des Grundfeldes. Die geraden Stromharmonischen sind gleichphasig und wirken daher gleichzeitig auf die Harmonischen aller Polkurven. Hieraus ergeben sich die pulsierenden um 90° verschobenen Felder, wie erläutert.

Ein Unterschied dieses Systems gegenüber dem früher behandelten symmetrischen Vierphasensystem in Bezug auf die Beschaffenheit des Feldes besteht nur darin, dass hier die geraden Stromharmonischen zur Wirkung kommen können. Eine Zwangläufigkeit zwischen den ungeraden Harmonischen wie beim Dreiphasensystem, welche dort bewirkt, dass dreifache Harmonische nicht auftreten können, besteht bei diesen Systemen nicht.

II. Einfluss der Formen des Drehfeldes auf den Gang der asynchronen Maschinen.

1. Wickelungsfaktoren von Phasenankern.

Durch die im vorhergehenden eingeführte Betrachtungsweise haben wir einen Ausgangspunkt erhalten, von dem aus wir die Vorgänge in einem noch so komplizierten Drehfelde eines beliebigen Mehrphasensystems einheitlich betrachten und rechnerisch verfolgen können; wir haben nämlich im wesentlichen nur die Rechnungen für ein Sinusfeld durchzuführen, und diese lassen sich dann mit den Modifikationen, die durch die verschiedenen Pol- und Periodenzahlen entstehen, auch auf sämtliche höhere Harmonische des Feldes anwenden.

Wir betrachten nun zunächst den Fall, dass die sekundäre Wickelung der Maschine offen ist. Die Polkurve kann eine beliebige Zahl

von ungeraden höheren Harmonischen enthalten. Diese Harmonischen der einzelnen Polkurven bilden jeweils miteinander die Harmonischen des resultierenden Feldes, die entweder rotierend oder pulsierend sein können, wie erläutert. Das Feld sei von einem sinusförmigen Mehrphasenstrom von p Phasen erzeugt; die Periodenzahl desselben sei $c = \frac{1}{T}$. Die Windungszahl pro Phase des primären Stromkreises sei w_1. Wir betrachten zuerst die erste Harmonische des resultierenden Feldes und bezeichnen die gesamte Kraftlinienzahl dieser Harmonischen mit Φ_1. Würde diese magnetische Strömung Φ_1 gleichzeitig durch alle w_1 Windungen einer Phase hindurchtreten, so würde in derselben eine E.M.K.

$$e = E_0 \sin \frac{2\pi}{T} t$$

induziert werden, so dass

$$\frac{E_0}{\sqrt{2}} = \mathrm{E}_0 = 4{,}44\, c\, \Phi_1\, w_1\, 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Hier bezeichne E_0 die Amplitude und E_0 den effektiven Wert der E.M.K.

Liegen dagegen die w_1 Windungen auf dem Ankerumfange verteilt und zwar so, dass pro Phase und Pol s Nuten vorhanden sind, so ist die räumliche Verschiebung zweier benachbarter Nuten oder Spulen

$$\frac{X}{2ps},$$

wo X wie früher die Wellenlänge des Feldes oder den Abstand zwischen den Mittelpunkten zweier gleichnamiger Pole (am Ankerumfang gemessen) bedeutet. Die zeitliche Verschiebung der vom Sinusfelde in zwei benachbarten Spulen induzierten E.M.Ke. ist folglich:

$$\frac{T}{2ps}.$$

Die in den Spulen 1, 2, 3 ... s induzierten E.M.Ke. sind nun der Reihe nach:

$$\frac{E_0}{s} \sin \frac{2\pi}{T} t,\quad \frac{E_0}{s} \sin \frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{T}{2ps}\right),$$

$$\ldots \frac{E_0}{s} \sin \frac{2\pi}{T}\left(t - (s-1)\frac{T}{2ps}\right).$$

Die gesamte E.M.K. pro Phase ist also in einem Moment t

$$e_{01} = \sum_{0}^{s-1}\sigma \frac{E_0}{s} \sin \frac{2\pi}{T}\left(t - \sigma \frac{T}{2ps}\right).$$

Wir multiplizieren diese Gleichung rechts und links mit

$$\sin \frac{2\pi}{4ps},$$

wobei wir erhalten:

$$e_{01} \sin \frac{2\pi}{4ps} = \frac{E_0}{s}\left[\sin \frac{2\pi}{4ps} \sin \frac{2\pi}{T} t + \sin \frac{2\pi}{4ps} \sin \frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{T}{2ps}\right) + \dots\right.$$
$$\left.\dots + \sin \frac{2\pi}{4ps} \sin \frac{2\pi}{T}\left(t - (s-1)\frac{T}{2ps}\right)\right]$$
$$= \frac{E_0}{s}\left[-\frac{1}{2}\cos 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{1}{4ps}\right) + \frac{1}{2}\cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{1}{4ps}\right)\right.$$
$$-\frac{1}{2}\cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{1}{4ps}\right) + \dots$$
$$\left.\dots + \frac{1}{2}\cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - (s-1)\frac{1}{2ps} - \frac{1}{4ps}\right)\right]$$
$$= \frac{E_0}{s}\left[-\frac{1}{2}\cos 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{1}{4ps}\right) + \frac{1}{2}\cos 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{1}{4ps} - \frac{1}{2p}\right)\right],$$

weil die Glieder in der Mitte verschwinden. Der letztere Ausdruck kann wieder geschrieben werden:

$$= \frac{E_0}{s} \sin \frac{2\pi}{4p} \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{1}{4ps} - \frac{1}{4p}\right).$$

Somit ist die momentane E.M.K.:

$$e_{01} = E_0 \frac{\sin \frac{2\pi}{4p}}{s \sin \frac{2\pi}{4ps}} \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{1}{4ps} - \frac{1}{4p}\right)$$
$$= E_{01} \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{1}{4ps} - \frac{1}{4p}\right)$$
$$= E_0 K_1 \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{1}{4ps} - \frac{1}{4p}\right),$$

wo

$$K_1 = \frac{\sin \frac{2\pi}{4p}}{s \sin \frac{2\pi}{4ps}}.$$

K_1 nennen wir den E.M.K.-Faktor der p-phasigen s-Lochwickelung in Bezug auf die erste Harmonische des Drehfeldes. Für die Einlochwickelung ($s = 1$) ist $K_1 = 1$.

Die pro Phase induzierte effektive E.M.K. findet sich hiernach für die erste Harmonische des Drehfeldes gleich

$$E_{0\,1} = K_1 E_0 = 4{,}44\ K_1\, c\, \Phi_1\, w_1\, 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Betrachten wir nun zweitens irgend eine andere Harmonische der Polkurve, z. B. die m^{te}. Aus derselben entsteht die m^{te} Harmonische in der resultierenden Feldkurve. Die Periodenzahl dieser Harmonischen ist, weil sie von demselben Sinusstrome erzeugt wird, wie die erste Feldharmonische, gleich c. Bezeichnen wir die gesamte Kraftlinienzahl dieser Harmonischen mit Φ_m, so ist die von derselben induzierte effektive E.M.K.:

$$E_{0\,m} = 4{,}44\ K_m\, c\, \Phi_m\, w_1\, 10^{-8} \text{ Volt.}$$

K_m ist der E.M.K.-Faktor der p-phasigen s-Lochwickelung in Bezug auf die m^{te} Harmonische des Feldes. K_m finden wir in ähnlicher Weise wie K_1. Die räumliche Verschiebung zweier benachbarter Nuten ist, wie gezeigt:

$$\frac{X}{2\,p\,s}.$$

Weil die m^{te} Feldharmonische $\frac{1}{m}$ der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der ersten hat, entspricht dieser räumlichen Verschiebung eine zeitliche Verschiebung in der induzierten E.M.K. von

$$\frac{m\,T}{2\,p\,s}.$$

Die in den Spulen 1, 2, 3 ... s induzierten E.M.Ke. sind für die m^{te} Feldharmonische:

$$\frac{E_0}{s} \sin\frac{2\pi}{T} t,\quad \frac{E_0}{s} \sin\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{m\,T}{2\,p\,s}\right) \ldots$$

$$\frac{E_0}{s} \sin\frac{2\pi}{T}\left(t - (s-1)\frac{m\,T}{2\,p\,s}\right),$$

wobei E_0 die Amplitude der E.M.K. ist für den Fall, dass pro Pol und Phase nur eine Nut vorhanden wäre. Die momentane gesamte E.M.K. in der Phase ist also:

$$e_{0\,m} = \sum_{0}^{s-1}\sigma\ \frac{E_0}{s} \sin\frac{2\,p}{T}\left(t - \sigma\,\frac{m\,T}{2\,p\,s}\right).$$

Hieraus findet man durch dieselbe Umformung wie vorhin den E.M.K.-Faktor der p-phasigen s-Lochwickelung in Bezug auf die m^{te} Harmonische des Feldes:

$$K_m = \frac{\sin m \frac{2\pi}{4p}}{s \cdot \sin m \frac{2\pi}{4ps}}.$$

Ist uns nun die Form der Polkurve und daraus die Grössen Φ_1, Φ_3, ... Φ_m bekannt, so können wir hieraus für einen sinusförmigen Strom die einzelnen induzierten E.M.Ke.

$$E_{01}, E_{03} \ldots E_{0m}$$

berechnen. Diese E.M.Ke. sind ebenfalls alle von Sinusform mit derselben Periodenzahl wie der zugeführte Strom. Die im ganzen induzierte E.M.K. in einer Phase der primären Wickelung ist

$$\Sigma E_{0m}.$$

Dabei ist zu beachten, dass die induzierten Spannungen E_0 nicht immer dieselbe Phase zu haben brauchen; im allgemeinen ist deswegen die Summe geometrisch zu bilden.

Wir sehen also, dass von einem Sinusstrom eine Sinusspannung induziert wird, unabhängig von der Form des rotierenden Feldes. Dasselbe gilt für alle Harmonischen des Stromes; ferner sind die E.M.K.-Faktoren K unabhängig von der Periodenzahl des Stromes, sie sind also für die n^{te} Stromharmonische dieselben wie für die erste.

Die effektive E.M.K. E_{0nm} von der Periodenzahl n c, welche von der $n m^{ten}$ Harmonischen des resultierenden Feldes mit der Linienzahl Φ_{nm} pro halbe Welle (Pol) in einer Phase der primären Wickelung erzeugt wird, ist:

$$E_{0nm} = 4{,}44\, K_m\, n\, c\, \Phi_{nm}\, w_1\, 10^{-8} \text{ Volt}.$$

Und die gesamte E.M.K. von der Periodenzahl n c, die induziert wird, ist

$$E_{0n} = \Sigma E_{0nm},$$

wobei die Summation geometrisch auszuführen ist und sich über alle Feldharmonischen m erstrecken soll.

Nehmen wir nun bei offener sekundärer Wickelung (Leerlauf) wiederum einen sinusförmigen, vorläufig als wattlos gedachten primären Strom J_0 an, bezeichne ferner Φ' den gesamten magnetischen Kraft-

fluss pro Pol und Phase (Inhalt einer halben Welle der Polkurve), so ist

$$\Phi' = \sqrt{2}\,\frac{w_1 J_0}{P R},$$

wobei R = magnetischer Widerstand (Reluktanz) im Luftraum pro Pol, P = gesamte Polzahl, w_1 = Windungszahl pro Phase.

Diese Gleichung ist gültig unter der Voraussetzung, dass alle Φ' Kraftlinien eines Pols durch alle $\frac{w_1}{P}$ Windungen eines Pols hindurchtreten. Dies würde nur bei einer Einlochwickelung der Fall sein. Wir nehmen zunächst eine solche Wickelung an. Wir zerlegen die Polkurve, deren Inhalt gleich Φ', in ihre einzelnen Sinuswellen, deren Inhalt bezw.

$$\Phi_1';\ \Phi_3';\ \Phi_5' \ldots \Phi_m'$$

ist. Hierin setzen wir:

$$\Phi_1' = f_1\,\Phi';\ \Phi_3' = f_3\,\Phi' \ldots \Phi_m' = f_m\,\Phi'.$$

Die magnetische Strömung pro Pol des resultierenden Drehfeldes für die einzelnen Harmonischen, oder der Inhalt pro halbe Welle der resultierenden Feldkurve der einzelnen Harmonischen ist:

$$\Phi_1 = \frac{p}{2}\,\Phi_1' = \frac{p}{2}\,f_1\,\Phi',$$

$$\Phi_3 = \frac{p}{2}\,\Phi_3' = \frac{p}{2}\,f_3\,\Phi' \quad \text{u. s. w.}$$

Für die m^{te} Harmonische der resultierenden Feldkurve ist

$$\Phi_m = \frac{p}{2}\,f_m\,\Phi',$$

wobei p wie früher gleich Phasenzahl des Systems. Für alle m, welche durch p teilbar sind, ist, sofern $p > 1$, $\Phi_m = 0$. Hier führen wir den Wert von Φ' ein und erhalten:

$$\Phi_m = \frac{p}{2}\,\frac{\sqrt{2}}{R}\,\frac{w_1}{P}\,f_m\,J_0.$$

Diesen Wert von Φ_m setzen wir nun in den früher gefundenen Ausdruck für E_{0m} ein und bekommen:

$$E_{0m} = 4{,}44\,\frac{p}{2}\,\frac{\sqrt{2}}{R}\,\frac{w_1^2}{P}\,c\,f_m\,K_m\,J_0\,10^{-8}\ \text{Volt}.$$

Den Faktor f_m bezeichnen wir passend als den AW-Faktor der Wickelung in Bezug auf die m^te Harmonische des resultierenden Feldes.

Drücken wir nun das Verhältnis zwischen der wattlosen Komponente des Magnetisierungsstromes und der von der m^ten Harmonischen des Feldes induzierten Spannung durch den Faktor b_{0m} aus, indem wir setzen:

$$J_{0m} = b_{0m} E_{0m},$$

wobei

$$b_{0m} = \frac{10^8 R P}{4{,}44 \frac{p}{2} \sqrt{2}\, w_1^2 c f_m K_m},$$

so ist b_{0m} die Susceptanz des Stromkreises in Bezug auf die m^te Harmonische des Feldes. Weil alle Feldharmonischen m von demselben sinusförmigen Magnetisierungsstrome erzeugt werden, ist:

$$J_0 = J_{01} = J_{02} = \ldots = J_{0m} = b_{01} E_{01} = b_{02} E_{02} = \ldots = b_{0m} E_{0m}.$$

Die gesamte E.M.K., die von dem Sinusstrome induziert wird, und welche ebenfalls von Sinusform ist, ist somit:

$$\Sigma E_{0m} = J_0 \Sigma \frac{1}{b_{0m}}.$$

Die Summation ist, wie früher gesagt, im allgemeinen geometrisch zu bilden. In einem p-Phasensystem $(p > 1)$ sind alle b_m, für welche m durch p teilbar ist, unendlich, also $\frac{1}{b_{0m}} = 0$.

Die gegebene Entwickelung, welche für einen Sinusstrom gilt, ist für jede beliebige Periodenzahl dieses Stromes gültig; sie gilt also auch, wenn man die Periodenzahl auf das n-fache vergrössert. Dabei bekommt man aber die n-fache Harmonische des Stromes mit der Periodenzahl n c. Für die n m^te Harmonische des Feldes ist also:

$$b_{0nm} = \frac{10^8 R P}{4{,}44 \frac{p}{2} \sqrt{2}\, w_1^2 n c f_m K_m} = \frac{b_{0m}}{n}.$$

Die induzierte Spannung der n-fachen Stromharmonischen ist somit die geometrische Summe:

$$\Sigma E_{0nm} = J_{0n} \Sigma \frac{1}{b_{0nm}} = J_{0n} \Sigma \frac{n}{b_{0m}},$$

gebildet über alle Feldharmonischen m wie oben.

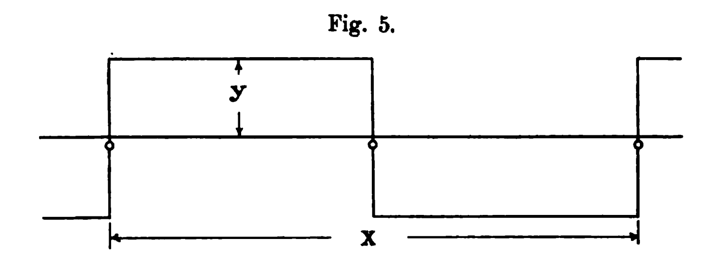
Wir haben den AW-Faktor definiert als das Verhältnis:

$$f_m = \frac{\Phi_m'}{\Phi'},$$

wo Φ_m' gleich dem Inhalt der halben Welle der m^{ten} Polkurvenharmonischen und Φ' gleich dem Inhalt derjenigen Polkurve ist, die sich bei der Einlochwickelung ergeben würde. Letztere ist immer ein Rechteck.

Betrachten wir nun zuerst die Einlochwickelung; die konstante Ordinate sei Y, die Wellenlänge wie früher X (Fig. 5).

Fig. 5.



Wir entwickeln diese Kurve in eine Fouriersche Reihe:

$$Y = A_1 \sin \frac{2\pi}{X} x + A_3 \sin 3 \frac{2\pi}{X} x + \ldots A_m \sin m \frac{2\pi}{X} x + \ldots,$$

wo x die veränderliche Abscisse bedeutet. Die Amplitude der m^{ten} Welle ist:

$$A_m = \frac{4}{X} \int_0^{\frac{X}{2}} Y \sin m \frac{2\pi}{X} x \, dx = \frac{1}{m} \frac{4}{\pi} Y$$

und hieraus:

$$f_m = \frac{\frac{1}{m} \frac{4}{\pi} Y \int_0^{\frac{X}{2}} \sin m \frac{2\pi}{X} x \, dx}{Y \frac{X}{2}} = \frac{8}{\pi^2} \frac{1}{m^2}.$$

Hierbei muss die Beziehung bestehen:

$$\begin{aligned} \Phi' &= \Phi_1' + \Phi_3' + \Phi_5' + \ldots + \Phi_m' + \ldots \\ &= f_1 \Phi' + f_3 \Phi' + f_5 \Phi' + \ldots + f_m \Phi' + \ldots \\ &= \Phi' \Sigma f_m; \end{aligned}$$

also

$$\Sigma f_m = 1,$$

wenn die Summation über alle ungeraden m gebildet wird. Es ist also:

$$\frac{8}{\pi^2}\Sigma\frac{1}{m^2}=\frac{8}{\pi^2}\left(\frac{1}{1^2}+\frac{1}{3^2}+\frac{1}{5^2}+\frac{1}{7^2}+\ldots+\frac{1}{m^2}+\ldots\right)=1.$$

Der AW-Faktor der Einlochwickelung in Bezug auf die erste Harmonische der Polkurve ist

$$f_1=\frac{8}{\pi^2}=0{,}81.$$

Die höheren Faktoren nehmen, wie man sieht, schnell ab, so ist z. B.

$$f_3=\frac{0{,}81}{9}=0{,}09.$$

Haben wir dagegen die w_1 Windungen in s Nuten pro Pol und Phase verteilt, so ist die räumliche Verschiebung zweier benachbarter Spulen

$$\frac{X}{2ps}.$$

Die jeder Spule entsprechende Polkurve ist ein Rechteck von der Höhe

$$y=\frac{1}{s}Y;$$

wo Y die Höhe der Polkurve darstellt für den Fall, dass die w_1 Windungen in einer Nut pro Pol und Phase untergebracht wären. Wir bekommen somit s Polkurven von rechteckiger Form und von der gleichen Höhe y, dieselben sind im Raume um $\frac{X}{2ps}$ verschoben.

Wir entwickeln nun diese s Rechtecke in Fouriersche Reihen, indem wir die Ordinaten derselben mit $y_1, y_2 \ldots y_s$ bezeichnen.

$$y_1=\frac{1}{s}A_1\sin\frac{2\pi}{X}x+\frac{1}{s}A_3\sin 3\frac{2\pi}{X}x+\ldots\frac{1}{s}A_m\sin m\frac{2\pi}{X}x+\ldots,$$

$$y_2=\frac{1}{s}A_1\sin\frac{2\pi}{X}\left(x-\frac{X}{2ps}\right)+\frac{1}{s}A_3\sin 3\frac{2\pi}{X}\left(x-\frac{X}{2ps}\right)$$
$$+\ldots\frac{1}{s}A_m\sin m\frac{2\pi}{X}\left(x-\frac{X}{2ps}\right)+\ldots$$

. . . .

$$y_s=\frac{1}{s}A_1\sin\frac{2\pi}{X}\left(x-(s-1)\frac{X}{2ps}\right)+\frac{1}{s}A_3\sin 3\frac{2\pi}{X}\left(x-(s-1)\frac{X}{2ps}\right)$$
$$+\ldots\frac{1}{s}A_m\sin m\frac{2\pi}{X}\left(x-(s-1)\frac{X}{2ps}\right)+\ldots$$

Hierin haben A_1, A_3, ... A_m dieselben Werte wie früher, also

$$A_m = \frac{1}{m}\,\frac{4}{\pi}\,Y.$$

Wir nehmen nun die m^te Harmonische der Polkurve und bezeichnen ihre Ordinate in einem beliebigen Punkt x des Umfanges mit y_m, diese Ordinate ist

$$y_m = \frac{1}{s}\,A_m \left[\sin m\,\frac{2\pi}{X}\,x + \sin m\,\frac{2\pi}{X}\left(x - \frac{X}{2ps}\right) + \ldots \sin m\,\frac{2\pi}{X}\left(x - (s-1)\,\frac{X}{2ps}\right)\right].$$

Durch Multiplikation auf beiden Seiten des Gleichheitszeichens mit

$$\sin m\,\frac{2\pi}{4ps}$$

erhält man:

$$y_m = \frac{1}{s}\,A_m\,\frac{\sin m\,\frac{2\pi}{4p}}{\sin m\,\frac{2\pi}{4ps}}\,\sin m\,2\pi\left(\frac{x}{X} + \frac{1}{4ps} - \frac{1}{4p}\right).$$

Die Amplitude dieser Welle ist:

$$A_m\,\frac{\sin m\,\frac{2\pi}{4p}}{s\sin m\,\frac{2\pi}{4ps}} = \frac{1}{m}\,\frac{4}{\pi}\,Y\,\frac{\sin m\,\frac{2\pi}{4p}}{s\sin m\,\frac{2\pi}{4ps}}$$

und ihr Inhalt:

$$\Phi_m' = \frac{8}{\pi^2}\,\frac{X}{2m^2}\,Y\,\frac{\sin m\,\frac{2\pi}{4p}}{s\sin m\,\frac{2\pi}{4ps}}.$$

Folglich ist der AW-Faktor dieser Harmonischen

$$f_m = \frac{\Phi_m'}{\Phi_m} = \frac{\Phi_m'}{\frac{1}{2}XY} = \frac{8}{\pi^2}\,\frac{1}{m^2}\,\frac{\sin m\,\frac{2\pi}{4p}}{s\sin m\,\frac{2\pi}{4ps}}$$

Früher haben wir für den E.M.K.-Faktor gefunden:

$$K_m = \frac{\sin m\,\frac{2\pi}{4p}}{s\,.\,\sin m\,\frac{2\pi}{4ps}}.$$

Zwischen dem AW-Faktor und dem E.M.K.-Faktor einer Harmonischen m besteht somit das Verhältnis

$$\frac{f_m}{K_m} = \frac{8}{\pi^2} \frac{1}{m^2}.$$

Daselbe ist unabhängig von der Phasenzahl des Systems und von der Nutenzahl der Wickelung.

2. Die Faktoren der Käfigwickelung.

Sehen wir vorläufig von dem Widerstande der Endverbindungen ab, so können wir eine Käfigwickelung als eine sterngeschaltete Wickelung betrachten, die ebenso viele Phasen besitzt, als Drähte (oder Stäbe) pro Wellenlänge des Feldes vorhanden sind; denn in jedem Stab wird von einem Sinusfeld eine E.M.K. induziert, deren Phase der Stellung des betreffenden Stabes am Umfange des Ankers entspricht. In einer Maschine, deren ganze Polzahl gleich P ist, haben wir uns $\frac{P}{2}$ solche Mehrphasensysteme parallel geschaltet zu denken. Pro Phase ist ein Stab also die Windungszahl $w = \frac{1}{2}$ zu setzen. Jede Phase hat eine Einlochwickelung, deren Faktoren, wie wir gesehen haben,

$$K_1 = 1; \; f_1 = \frac{8}{\pi^2} = 0{,}81$$

sind.

Einer höheren Feldharmonischen gegenüber (z. B. der m^{ten}) verhält sich die Käfigwickelung ebenfalls als eine mehrphasige Einlochwickelung, nur ist die Phasenzahl der m^{ten} Harmonischen gegenüber nur $\frac{1}{m}$ von derjenigen in Bezug auf das Grundfeld. Ist somit die Stabzahl der Wickelung pro doppelte Polteilung oder pro Wellenlänge X des Grundfeldes gleich p^0, so haben wir in Bezug auf das Grundfeld die Phasenzahl gleich p^0, und in Bezug auf die m^{te} Feldharmonische dieselbe gleich $\frac{p^0}{m}$ zu setzen. Die Faktoren K und f bleiben dabei für alle Feldharmonischen konstant, und zwar ist wie für K_1 und f_1 der Einlochwickelung:

$$K_m = 1; \; f_m = \frac{8}{\pi^2} = 0{,}81.$$

Weil, wie gezeigt, in einer Maschine mit P Polen $\frac{P}{2}$ p^0-Phasen-

systeme parallel geschaltet sind, und weil jedes System nur eine halbe Windung besitzt, so haben wir pro Phase eine Windungszahl $w = \frac{P}{4}$ einzuführen. Bezeichnen wir ferner mit r_s den Widerstand und mit x_s die Reaktanz eines Stabes, so haben wir für eine Windung, gleich zwei Stäben, den Widerstand $2 r_s$ und die Reaktanz $2 x_s$; somit ist für die ganze Phase von $\frac{P}{4}$ Windungen

$$\text{der Widerstand} \quad = \frac{P}{2} r_s$$

$$\text{und die Reaktanz} = \frac{P}{2} x_s$$

einzuführen.

Es sind nun die Widerstände der beiden Ringe, welche die Enden der Stäbe an jeder Stirnfläche des Ankers miteinander verbinden, zu berücksichtigen. Um die Darstellung zu vereinfachen, wollen wir annehmen, dass der Ring an der einen Stirnfläche des Ankers einen sehr grossen Querschnitt hat, so dass wir dessen Widerstand vernachlässigen können, ebenso denken wir uns diesen Ring als induktionsfrei, während wir uns den Widerstand und die Selbstinduktion des zweiten Ringes verdoppelt denken. Durch diese Annahme sind die Widerstände und die Reaktanzen aller Stromwege des Kurzschlussankers unverändert geblieben. Fassen wir nun die p^0 Stäbe, welche auf der doppelten Polteilung des Ankers liegen, ins Auge, so bilden dieselben ein p^0-phasiges Sternsystem, dessen neutraler Punkt 0 von dem Kurzschlussring mit dem Widerstand Null gebildet wird. Dies Sternsystem ist gewissermassen als der Generator aufzufassen; denn in den sterngeschalteten Ankerstäben werden die Ströme erzeugt. Die zwischen den einzelnen Stäben liegenden Ringsegmente des Kurzschlussringes mit doppeltem Widerstand bilden die in Ring geschaltete Belastung dieses Mehrphasensystems. Die Aufgabe ist nun unter Annahme eines sinusartigen Feldes auf den einfachen Fall eines symmetrischen Mehrphasensystems mit dem Generator in Stern- und der Belastung in Ringschaltung reduziert.

Ist E_s die induzierte E.M.K., J_s der Strom und Z_s die Impedanz eines Stabes, so haben wir in symbolischer Schreibweise für die Spannung E_s', zwischen dem neutralen Punkte 0 und dem Endpunkte des Stabes (Phasenspannung der Sternschaltung)

$$E_s' = E_s - Z_s J_s.$$

Setzen wir der Kürze wegen die komplexe Grösse

$$\varepsilon = \cos\frac{2\pi}{p^0} + j\sin\frac{2\pi}{p^0},$$

so ist bekanntlich[1]) in einem p^0-Phasen-Sternsystem die verkettete Spannung (hier Spannung zwischen zwei benachbarten Stabenden) gleich

$$(1-\varepsilon)\,.\,E_s' = J_r Z_r,$$

wobei J_r den Strom und Z_r die Impedanz eines Ringsegmentes zwischen zwei benachbarten Stäben bedeuten. Zwischen dem verketteten und dem unverketteten Strom muss die Beziehung bestehen

$$J_r = -\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} J_s,$$

somit

$$E_s = J_s\left(Z_s - \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)^2} Z_r\right).$$

Hierin ist

$$1-\varepsilon = 1-\cos\frac{2\pi}{p^0} - j\sin\frac{2\pi}{p^0}$$

$$= k(\cos\alpha - j\sin\alpha),$$

wobei

$$k = 2\sin\frac{\pi}{p^0},$$

$$\cos\alpha = \frac{1-\cos\frac{2\pi}{p^0}}{2\sin\frac{\pi}{p^0}} = \sin\frac{\pi}{p^0},$$

$$\sin\alpha = \frac{\sin\frac{2\pi}{p^0}}{2\sin\frac{\pi}{p^0}} = \cos\frac{\pi}{p^0}.$$

Ferner ist

$$(1-\varepsilon)^2 = k^2(\cos 2\alpha - j\sin 2\alpha),$$

$$= -k^2\left(\cos\frac{2\pi}{p^0} + j\sin\frac{2\pi}{p^0}\right),$$

$$= -k^2\varepsilon.$$

Man hat somit

$$E_s = J_s\left(Z_s + \frac{Z_r}{k^2}\right).$$

Die Kurzschlussringe wirken somit gerade so, als ob die Impedanz

[1]) Vergl. Steinmetz, Alternating Current Phenomena, Cpt. XXIV u. XXVI.

jedes Stabes um die Grösse $\frac{Z_r}{k^2}$ vergrössert wäre. Hierbei ist Z_r die doppelte Impedanz von dem Stück eines Ringes, das zwischen zwei benachbarten Stäben liegt. Seien r_r und x_r bezw. der doppelte Widerstand und die doppelte Reaktanz eines solchen Stückes, so ist der reduzierte Widerstand eines Stabes

$$r_s' = r_s + \frac{r_r}{k^2}$$

und die reduzierte Reaktanz

$$x_s' = x_s + \frac{x_r}{k^2},$$

wobei

$$k = 2 \sin \frac{\pi}{p^0}.$$

Für eine Phase der Sekundärwickelung haben wir dann nach dem Früheren zu setzen:

$$\text{Widerstand} = \frac{P}{2} r_s',$$

$$\text{Reaktanz} \quad = \frac{P}{2} x_s',$$

wobei die Windungszahl der Phase gleich $\frac{P}{4}$ zu setzen ist.

Ist das Feld nicht von Sinusform, so kann man sich dasselbe, wie wir gesehen haben, aus Harmonischen zusammengesetzt denken; jede dieser Harmonischen erzeugt in dem rotierenden Anker einen sinusförmigen Mehrphasenstrom. Weil die von den einzelnen Harmonischen erzeugten E.M.Ke. und Ströme bei rotierendem Anker alle verschiedene Periodenzahlen haben, so verlaufen sie vollständig unabhängig voneinander, und man kann die Wirkung jeder Feldharmonischen auf den Anker für sich betrachten.

Wie man für ein höheres Feld die Wickelungsfaktoren K_m und f_m bestimmt, haben wir schon gesehen; es bleibt nur noch die Bestimmung der Impedanz.

Um die Impedanz der Käfigwickelung in Bezug auf die m^{te} Harmonische zu bestimmen, kann man die eben durchgeführte Rechnung wiederholen, hierbei bleibt alles unverändert bis auf die Grösse k, welche sich entsprechend der Aenderung der Phasenzahl ändert. Für das m^{te} Feld ist

$$k_m = 2 \sin \frac{m\pi}{p^0}.$$

Hier sind somit die reduzierten Werte von Widerstand und Reaktanz:

$$r_s{'}_m = r_s + \frac{r_r}{k_m{}^2}; \qquad x_s{'}_m = x_s + \frac{x_r}{k_m{}^2}.$$

3. Der Ersatzstromkreis der Mehrphasenmaschine.

Nachdem wir nun die Faktoren für die gewöhnlichsten Wickelungen behandelt haben, gehen wir zu der Betrachtung der Wirkungsweise der Maschine bei geschlossener Sekundärwickelung über. Wir betrachten zuerst wieder die Verhältnisse unter der Annahme eines sinusförmigen zugeführten Stromes. Die Polkurve soll aus einer beliebigen Zahl von höheren Harmonischen bestehen. Der Anker rotiere mit einer Winkelgeschwindigkeit ω^0, während die Rotationsgeschwindigkeit der einzelnen Harmonischen des resultierenden, durch primäre und sekundäre Wickelung hindurchtretenden, Hauptfeldes mit ω_1, $\omega_3 \ldots \omega_m$ bezeichnet sein möge.

Die Schlüpfungen der sekundären Wickelung in Bezug auf die einzelnen Harmonischen des resultierenden Feldes seien bezw. s_1, $s_2 \ldots s_m$. Wir haben dann:

$$s_1 = \frac{\omega_1 - \omega^0}{\omega_1}; \; s_3 = \frac{\omega_3 - \omega^0}{\omega_3}; \ldots s_m = \frac{\omega_m - \omega^0}{\omega_m}.$$

Für die m[te] Feldharmonische haben wir die in der primären Wickelung pro Phase induzierte E.M.K.

$$E_{0m} = 4{,}44\, K_m\, c\, \Phi_m\, w_1\, 10^{-8} \text{ Volt.}$$

In der sekundären Wickelung wird von derselben Feldharmonischen induziert

$$E_{0m}{'} = 4{,}44\, K_m{'}\, s_m\, c\, \Phi_m\, w_2\, 10^{-8} \text{ Volt}$$

$$= \frac{s_m\, K_m{'}\, w_2}{K_m\, w_1} E_{0m} \text{ Volt.}$$

Hierbei bedeutet $K_m{'}$ den E.M.K.-Faktor, w_2 die Windungszahl einer Phase der sekundären Wickelung.

Der hierdurch erzeugte Strom in der Sekundärwickelung ist

$$J_m{'} = \frac{E_m{'}}{Z_m{'}} \text{ Amp.}$$

Die Impedanz $Z_m{'}$ einer Phase der Sekundärwickelung in Bezug auf den von der m[ten] Feldharmonischen erzeugten Strom ist in komplexer Schreibweise

$$Z_m{'} = r_2 - j\, s_m\, x_2,$$

wobei r_2 den Ohmschen Widerstand, x_2 die Reaktanz bei Periodenzahl c einer Phase der sekundären Wickelung bedeutet. Setzt man zur Abkürzung

$$\frac{r_2}{s_m} = \rho_m,$$

so kann man schreiben

$$J_m' = \frac{s_m K_m' w_2}{K_m w_1} \frac{E_m}{r_2 - j s_m x_2} = \frac{K_m' w_2}{K_m w_1} \frac{E_m}{\rho_m - j x_2}.$$

Um die M.M.K. dieses sekundären Stromes zu kompensieren, muss der primäre Strom eine Komponente

$$J_{2m} = \frac{f_m' w_2 p_2}{f_m w_1 p_1} J_m' = \frac{p_2 K_m' f_m' w_2^2}{p_1 K_m f_m w_1^2} \frac{E_m}{\rho_m - j x_2}$$
$$= \frac{1}{a_m} E_m Y_{2m}$$

enthalten. Hierbei ist

$$\frac{p_2 K_m' f_m' w_2^2}{p_1 K_m f_m w_1^2} = \frac{1}{a_m}$$

gleich dem Uebersetzungsverhältnis von Primärwickelung auf Sekundärwickelung für die m[te] Feldharmonische, während

$$\frac{1}{\rho_m - j x_2} = Y_{2m} = g_{2m} + j b_{2m}.$$

die sekundäre Admittanz für die m[te] Feldharmonische bei der Schlüpfung s_m darstellt.

Eine weitere Komponente des primären Stromes ist der Magnetisierungsstrom; derselbe ist, abgesehen von der Energiekomponente,

$$J_{0m} = j b_{0m} E_{0m},$$

wobei nach S. 295

$$b_{0m} = \frac{10^8 RP}{4{,}44 \frac{p}{2} \sqrt{2} w_1^2 c K_m f_m}.$$

Der gesamte Primärstrom ist somit

$$J_1 = J_{2m} + J_{0m} = E_{0m}\left[\frac{1}{a_m}(g_{2m} + j b_{2m}) + j b_{0m}\right].$$

Hieraus sieht man, dass man sich die in Fig. 6 dargestellte Ersatzschaltung denken kann.

Die von der m[ten] Feldharmonischen induzierte E.M.K. E_{0m} kann als die Klemmenspannung von zwei parallel geschalteten Stromzweigen

angesehen werden; hiervon enthält der eine Zweig mit dem Strom J_{2m} die Admittanz

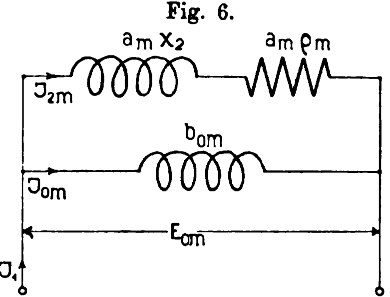
$$\frac{1}{a_m} Y_{2m} = \frac{1}{a_m} (g_{2m} + j\, b_{2m})$$

oder die Impedanz

$$a_m Z_{2m} = a_m (\rho_m - j\, x_2),$$

während der zweite Stromzweig mit dem Strome J_{0m} nur die Susceptanz b_{0m} enthält.

Fig. 6.



Wenn wir nun dem Indexe m die verschiedenen Werte 1, 3, 5 u. s. w. beilegen, so erhalten wir in der primären Wickelung die induzierten E.M.Ke. E_{01}, E_{03}, E_{05} u. s. w. und die gesamte von allen Harmonischen des resultierenden Feldes induzierte E.M.K. ist gegeben durch die geometrische Summe

$$E_0 = E_{01} + E_{03} + E_{05} + \ldots . E_{0m} + \ldots$$

Für alle Harmonischen gilt

$$J_{21} + J_{01} = J_{23} + J_{03} = J_{2m} + J_{0m} = J_1.$$

Wenn wir somit alle Feldharmonischen in Betracht ziehen, so bekommen wir den in Fig. 7 abgebildeten Ersatzstromkreis.

Bezeichne E_1 die primäre Klemmenspannung des Motors, so hat man

$$E_1 = E_0 + J_1 Z_1 = E_0 + \frac{J_1}{Y_1},$$

wobei

$$Z_1 = r_1 - j\, x_1,$$
$$Y_1 = g_1 + j\, b_1$$

bezw. die Impedanz und Admittanz der primären Wickelung bedeuten.

Die Energiekomponente des Erregerstromes haben wir bis jetzt vernachlässigt. Machen wir der Einfachheit wegen die Annahme, dass die Magnetisierungsarbeit nur von dem Erregerstrome der ersten Feldharmonischen geleistet wird, so müssen wir diesen Erregerstrom schreiben:

$$J_{01} = E_{01} Y_{01} = E_{01} (g_0 + j\, b_{01}),$$

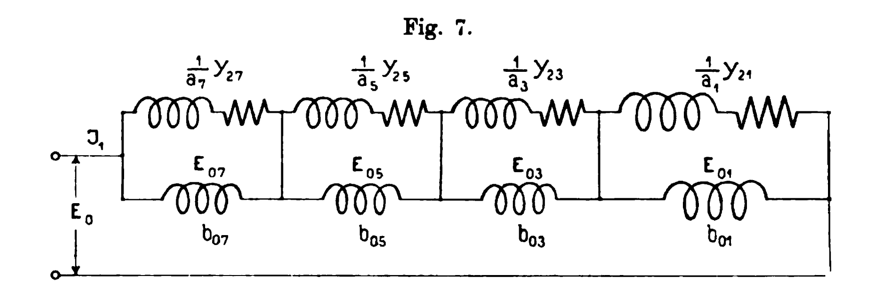
wobei

$$E_{01}^2 g_0 = \text{Effektverlust im Eisen pro Phase.}$$

Mit Berücksichtigung dieser Eisenverluste sowie der Admittanz in der primären Wickelung erhalten wir nun das in Fig. 8 abgebildete vollständige Ersatzschema mit Berücksichtigung der höheren Feldharmonischen bis mit der siebenten.

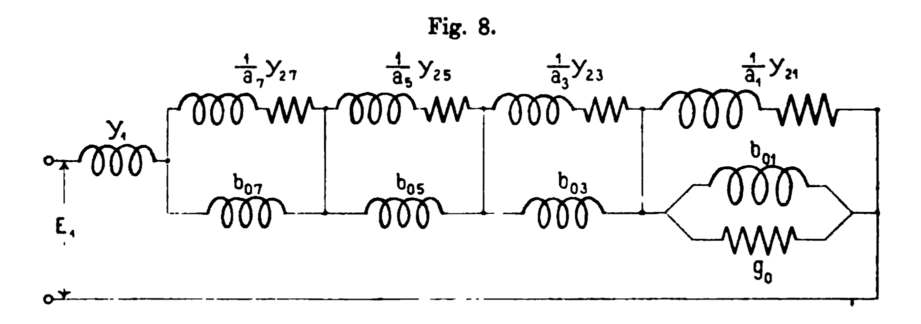
Der Ersatzstromkreis setzt sich somit aus der konstanten primären Admittanz Y_1 in Hintereinanderschaltung mit einer Serie von Leitungs-

Fig. 7.



elementen zusammen. Jedes dieser Leitungselemente besteht aus zwei parallel geschalteten Zweigen, wovon der eine eine mit der Belastung variierende Admittanz $\frac{1}{a_m} Y_{2m}$ besitzt, während der andere eine konstante Susceptanz b_{0m} enthält. Für die Grundschwingung des Feldes

Fig. 8.



ist statt der konstanten Susceptanz eine konstante Admittanz $Y_{01} = g_0 + j\,b_{01}$ zu setzen. Jeder Harmonischen m entspricht ein solches Leitungselement.

Wir wollen zuerst die Aenderung von $\frac{1}{a_m} Y_{2m}$ bei Aenderung der Belastung (oder Schlüpfung) untersuchen. Weil $\frac{1}{a_m}$ für eine Harmonische konstant ist, genügt die Untersuchung von Y_{2m}.

Wie gezeigt, ist

$$Y_{2m} = \frac{1}{\rho_m - j x_2} = g_{2m} + j b_{2m},$$

wo

$$\rho_m = \frac{r_2}{s_m}$$

und

$$g_{2m} = \frac{\rho_m}{\rho_m^2 + x_2^2}; \; b_{2m} = \frac{x_2}{\rho_m^2 + x_2^2}$$

$$\rho_m = x_2 \frac{g_{2m}}{b_{2m}}.$$

Hieraus hat man:

$$b_{2m} = \frac{1}{x_2 \left(\frac{g_{2m}^2}{b_{2m}^2} + 1\right)},$$

$$\frac{x_2}{b_{2m}} = \frac{1}{g_{2m}^2 + b_{2m}^2},$$

$$g_{2m}^2 + b_{2m}^2 - \frac{b_{2m}}{x_2} = 0.$$

Wenn man hier rechts und links $\frac{1}{4 x_2^2}$ addiert, kommt

$$g_{2m}^2 + \left(b_{2m} - \frac{1}{2 x_2}\right)^2 = \frac{1}{4 x_2^2}.$$

Betrachtet man g_{2m} als Ordinate und b_{2m} als Abscisse in einem rechtwinkligen Koordinatensystem, so sieht man, dass diese Gleichung einen Kreis darstellt, dessen Zentrum auf der Abscissenachse im Abstande $\frac{1}{2 x_2}$ vom Anfangspunkte liegt, und dessen Radius gleich $\frac{1}{2 x_2}$ ist. Die Admittanzen Y_{2m} sind also nach Grösse und Richtung als Strahlen vom Anfangspunkte aus zu diesem Kreise gegeben. Bilden wir nun für das m^{te} Element (m^{te} Harmonische) die Admittanz der Parallelschaltung von $\frac{1}{a_m} Y_{2m}$ und b_{0m}, und bezeichnen wir diese Admittanz mit $Y_m' = g_m' + j b_m$, so haben wir

$$g_m' + j b_m' = \frac{1}{a_m} g_{2m} + j \left(\frac{1}{a_m} b_{2m} + b_{0m}\right)$$

und hieraus

$$g_{2m} = a_m g_m',$$
$$b_{2m} = a_m (b_m' - b_{0m}).$$

Setzt man dies in die Kreisgleichung hinein, so kommt

$$g_m'^2 + \left[b_m' - \left(b_{0m} + \frac{1}{2\, a_m\, x_2}\right)\right]^2 = \frac{1}{4\, a_m^2\, x_2^2}.$$

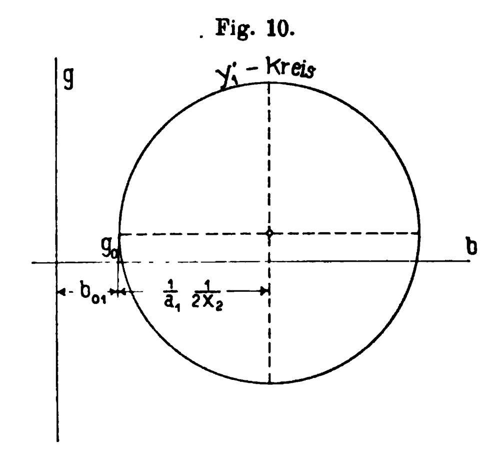
Für das m^{te} Element des Ersatzstromkreises oder für die m^{te} Harmonische des Drehfeldes bekommt man also den in Fig. 9 abgebildeten Admittanzkreis.

Fig. 9.

Für das erste Element oder für die Grundschwingung des Feldes hat man den in Fig. 10 gegebenen Admittanzkreis mit der Gleichung:

$$(g_1' - g_0)^2 + \left[b_1' - \left(b_{01} + \frac{1}{2\, a_1\, x_2}\right)\right]^2 = \frac{1}{4\, a_1^2\, x_2^2}.$$

Fig. 10.



Das allgemeine Problem würde nun darin bestehen, die resultierende Admittanz zwischen den Klemmen der Maschine, also der

Hintereinanderschaltung der einzelnen Admittanzen Y_1, Y_1', Y_3' ... Y_m' für die verschiedenen Schlüpfungen zu bestimmen. Die Schlüpfung s_m der sekundären Wickelung in Bezug auf die m^{te} Harmonische des Feldes liesse sich aus der Schlüpfung s_1 der Grundharmonischen nach den folgenden Formeln bestimmen:

$$\frac{\omega_1 - \omega_0}{\omega_1} = s_1 ; \qquad \frac{\omega_m - \omega_0}{\omega_m} = s_m ,$$

wobei:

ω_1 und ω_m gleich Winkelgeschwindigkeit der ersten resp. der m^{ten} Feldharmonischen,

ω_0 gleich Winkelgeschwindigkeit der sekundären Wickelung.

Hieraus hat man:

$$\omega_1 - \omega_m = s_1 \, \omega_1 - s_m \, \omega_m .$$

Ferner ist

$$\omega_m = \pm \frac{\omega_1}{m} .$$

Somit ist

$$s_m = \pm 1 - m + m \, s_1 .$$

Das positive Zeichen gilt, wenn die m^{te} Harmonische die gleiche Drehrichtung wie die erste hat, sonst gilt das negative Zeichen.

Die vollständige Lösung dieses Problems ist umständlich und bietet kein grosses praktisches Interesse. Wir werden uns damit begnügen, im folgenden eine angenäherte Lösung zu geben.

4. Vereinfachter Ersatzstromkreis.

a) Die Sekundärwickelung ist eine Phasenwickelung.

In dem Ausdrucke für die Susceptanz in Bezug auf die m^{te} Feldharmonische

$$b_{0m} = \frac{10^8 \, R P}{4{,}44 \, \frac{p}{2} \sqrt{2} \, w_1^2 \, c \, K_m \, f_m}$$

wird das Produkt

$$K_m \, f_m$$

sehr klein, sobald $m > 1$ wird.

Die entsprechende Reaktanz

$$x_{0m} = \frac{1}{b_{0m}}$$

wird dann bei zunehmendem m immer kleiner.

Untersuchen wir andererseits die Grössenordnung der zur Susceptanz b_{0m} in der Ersatzschaltung parallel geschalteten Impedanz

$$a_m(\rho_m - j x_2),$$

so sehen wir zwar, dass

$$\rho_m = \frac{r_2}{s_m} = \frac{r_2}{\pm 1 - m + m s_1}$$

bei zunehmendem m immer kleiner wird; dagegen bleibt x_2 konstant, und die Grösse

$$a_m = \frac{p_1 K_m f_m w_1^2}{p_2 K_m' f_m' w_2^2}$$

wird sich im allgemeinen nicht stark ändern, weil bei gleicher Wickelungsart primär und sekundär das Verhältnis

$$\frac{K_m f_m}{K_m' f_m'}$$

für die verschiedenen m etwa dasselbe bleiben muss und nicht sehr viel von der Einheit verschieden sein wird.

Betrachten wir nun die Ersatzschaltung, Fig. 8, und vernachlässigen wir für die höheren Werte von m die kleinen Grössen ρ_m, so können wir jedes Leitungselement der Ersatzschaltung als eine Parallelschaltung der beiden Susceptanzen

$$\frac{1}{a_m} b_{2m} = \frac{p_2 K_m' f_m' w_2^2}{p_1 K_m f_m w_1^2} \frac{1}{x_2}$$

und

$$b_{0m} = \frac{10^8 RP}{4{,}44 \frac{p}{2} \sqrt{2}\, w_1^2 c K_m f_m} = \frac{K_1 f_1}{K_m f_m} b_{01}$$

betrachten. Die gesamte Susceptanz der Parallelschaltung ist somit

$$b_m' = \frac{1}{a_m} b_{2m} + b_{0m}$$

und die Reaktanz

$$x_m' = \frac{1}{\frac{1}{a_m} b_{2m} + b_{0m}}$$

$$= \frac{1}{\frac{K_1 f_1}{K_m f_m}\left[\frac{p_2}{p_1} \frac{K_m' f_m'}{K_1 f_1} \frac{w_2^2}{w_1^2} \frac{1}{x_2} + b_{01}\right]}.$$

Die gesamte Reaktanz aller höheren Feldharmonischen ist somit

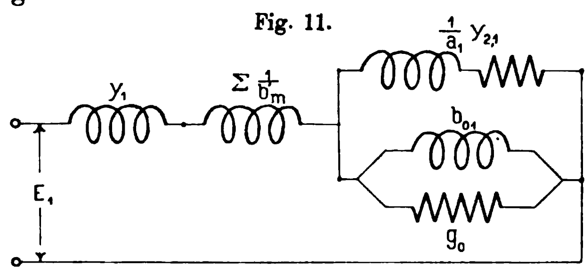
$$\Sigma x_m' = \frac{1}{K_1 f_1} \Sigma \frac{K_m f_m}{\frac{p_2}{p_1} \frac{K_m' f_m'}{K_1 f_1} \frac{w_2^2}{w_1^2} \frac{1}{x_2} + b_{01}}.$$

Für die höheren Werte von m kann man hier ohne grossen Fehler das erste Glied im Nennerausdruck gegenüber dem zweiten vernachlässigen; man hat dann für diese Reaktanz den Wert

$$\Sigma x_m' = \frac{\Sigma K_m f_m}{K_1 f_1 b_{01}} = \Sigma \frac{1}{b_m'}.$$

Hieraus erhalten wir die in Fig. 11 abgebildete vereinfachte Ersatzschaltung.

Fig. 11.



Die Wirkung der höheren Feldharmonischen ist also im wesentlichen mit einer Vergrösserung der primären Reaktanz der Maschine als gleichwertig zu betrachten. Diese Vergrösserung der Reaktanz lässt sich leicht bestimmen, wenn man für die primäre Wickelung die Summe $\Sigma K_m f_m$ kennt. In einem folgenden Abschnitte über Beispiele von Wickelungsfaktoren ist diese Summe für einige Wickelungen ausgerechnet.

b) Die Sekundärwickelung ist eine Käfigwickelung.

Wie gezeigt, ist in einer Käfigwickelung die Phasenzahl (und Polzahl) unbestimmt und richtet sich nach derjenigen des primären Feldes.

In der Ersatzschaltung haben wir für das m^te^ Leitungselement (m^te^ Feldharmonische) zu setzen:

$$\text{Windungszahl } (w_2) = \frac{P}{4},$$

$$\text{Phasenzahl } (p_2) = \frac{p_2}{m},$$

$$\text{Reaktanz } (x_2) = \frac{P}{2} x_{2m}',$$

wobei

$$x_{s\,m}' = x_s + \frac{x_r}{k_m^{\,2}},$$

$$K_m = \frac{1}{2} \sin \frac{m\,\pi}{p_2}.$$

Führen wir diese Werte in die Formel für die gesamte Reaktanz aller höheren Feldharmonischen ein, so erhalten wir

$$\Sigma\, x_m' = \Sigma \frac{K_m\, f_m}{\frac{0{,}81}{8} \frac{p_2}{p_1} \frac{1}{m} \frac{P}{w_1^{\,2}} \frac{1}{x_{s\,m}'} + K_1\, f_1\, b_{0\,1}}.$$

Für die höheren Feldharmonischen kommen die Reaktanzen der Endverbindungen des Käfigankers immer weniger in Betracht, so dass wir bei $m > 1$ setzen können:

$$x_{s\,m}' = x_s = \text{konstant für alle m.}$$

Die Ersatzschaltung ist bei Anwendung der Käfigwickelung dieselbe wie für die Phasenwickelung; nur ist für die Käfigwickelung die zusätzliche, von den höheren Feldharmonischen herrührende Reaktanz $\Sigma\, x_m'$ kleiner als bei der Phasenwickelung.

5. Ersatzstromkreis der Einphasenasynchronmaschine.

In der Einphasenasynchronmaschine wird von der primären Wickelung eine im Raume feststehende, mit dem primären Strome periodisch wechselnde, magnetomotorische Kraft erzeugt, welche bei offener Sekundärwickelung ein ebenfalls im Raume feststehendes Wechselfeld zur Folge hat. Wie bekannt, kann man sich aber ein derartiges Wechselfeld, sofern dasselbe sinusförmig ist, aus zwei in entgegengesetzter Richtung mit gleicher Geschwindigkeit rotierenden sinusförmigen Drehfeldern entstanden denken. Diese Drehfelder besitzen je die halbe Amplitude des Wechselfeldes. Ist das primäre Wechselfeld nicht sinusförmig, so kann man sich dasselbe in seine Harmonischen zerlegt und jede Harmonische durch zwei in entgegengesetzter Richtung rotierende sinusförmige Drehfelder ersetzt denken.

Die von den beiden Drehfeldern in der rotierenden Sekundärwickelung induzierten E.M.Ke. haben verschiedene Periodenzahlen und können deswegen unabhängig voneinander betrachtet werden. Dasselbe gilt für die in der rotierenden und geschlossenen Sekundärwickelung induzierten Ströme. Da diese Ströme für die beiden Felder nicht



die gleiche Stärke bekommen, sind die Amplituden der beiden resultierenden, durch primäre und sekundäre Wickelung hindurchtretenden Drehfelder nicht gleich, und zwar hat dasjenige Feld, was die gleiche Rotationsrichtung wie die Sekundärwickelung hat, die grössere Amplitude, während das umgekehrt rotierende die kleinere Amplitude hat.

Betrachten wir zuerst die Grundwelle der beiden Felder, und nehmen wir den primären Strom als sinusförmig an. Bezeichne Φ den Kraftfluss desjenigen Drehfeldes, das dieselbe Drehrichtung wie die Sekundärwickelung hat, und Φ' den Kraftfluss des umgekehrt rotierenden Drehfeldes. Die von dem ersten Felde, Φ, in der Primärwickelung induzierte E.M.K. ist dann:

$$E_0 = 4{,}44\, K\, c\, w_1\, \Phi\, 10^{-8} \text{ Volt},$$

wo

$$\Phi = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2}}{R} \frac{w_1}{P} f J_0.$$

J_0 gleich Erregerstrom in der primären Wickelung. Hieraus hat man:

$$E_0 = \frac{4{,}44 \frac{1}{2} \sqrt{2}\, K f c w_1^2}{10^8 R P} J_0 = Z_0 J_0$$

oder

$$J_0 = \frac{1}{Z_0} E_0 = Y_0 E_0,$$

wobei Y_0 gleich Erregeradmittanz des Feldes Φ. Ist s die Schlüpfung der Sekundärwickelung in Bezug auf dies Feld, so ist die in dieser Wickelung induzierte E.M.K.:

$$s \,.\, 4{,}44\, K'\, w_2\, c\, \Phi\, 10^{-8} = \frac{K' w_2}{K w_1} s E_0.$$

Der Strom, der dadurch in der sekundären Wickelung entsteht, ist:

$$J_2' = \frac{s E_0}{\frac{K w_1}{K' w_2} (r_2' - j s x_2')} = \frac{E_0}{\frac{K w_1}{K' w_2} \left(\frac{r_2'}{s} - j x_2'\right)},$$

wobei r_2' den Widerstand, x_2' die Reaktanz einer sekundären Phase bedeutet. Dem Strome J_2' in der Sekundärwickelung entspricht ein Strom J_2 in der Primärwickelung, der gegeben ist durch die Beziehung:

$$J_2 = p_2 \frac{w_2}{w_1} \frac{f'}{f} J_2' = \frac{E_0}{a \left(\frac{r_2'}{s} - j x_2'\right)},$$

wobei

$$a = \frac{1}{p_2} \frac{w_1^2}{w_2^2} \frac{K f}{K' f'}$$

gleich dem Uebersetzungsverhältnis der beiden Wickelungssysteme unter Berücksichtigung der Phasenzahlen und der Wickelungsfaktoren. Setzt man

$$r_2 = a\, r_2'$$

und

$$x_2 = a\, x_2',$$

so sind r_2 und x_2 die auf die primäre Wickelung reduzierten Werte des Widerstandes und der Reaktanz der Sekundärwickelung. Man hat dann einfach:

$$J_2 = \frac{E_0}{\frac{r_2}{s} - j\, x_2} = Y_2\, E_0,$$

wobei Y_0 die auf die Primärwickelung reduzierte Admittanz des sekundären Systems bei der Schlüpfung s bedeutet.

Man hat nun den gesamten Primärstrom:

$$J_1 = J_0 + J_2 = E_0\, (Y_0 + Y_2).$$

Betrachtet man nun das in der umgekehrten Richtung rotierende Feld, dessen Kraftfluss mit Φ' bezeichnet ist, so bleibt hierfür die obige Entwickelung im wesentlichen dieselbe. Nur ist die Schlüpfung der Sekundärwickelung in Bezug auf dies Feld gleich $2 - s$, und folglich ist hier die auf das primäre System reduzierte sekundäre Admittanz:

$$Y_2' = \frac{1}{\frac{r_2}{2-s} - j\, x_2}.$$

Ist E_0' die von diesem Felde in der Primärwickelung induzierte E.M.K., so hat man den primären Strom:

$$J_1 = E_0'\, (Y_0 + Y_2').$$

Die primäre Klemmenspannung E_1 ist

$$E_1 = E_0 + E_0' + J_1\, Z_1,$$

wobei Z_1 die Impedanz der Primärwickelung bedeutet.

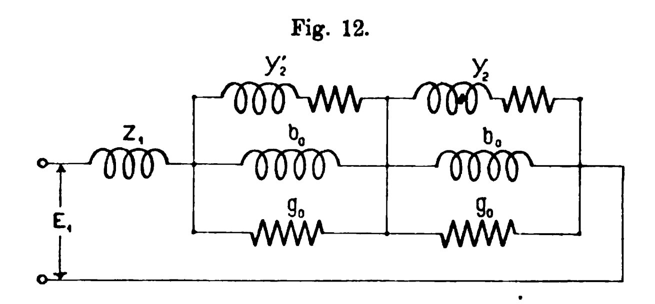
Setzt man nun weiter:

$$Y_0 = g_0 + j\, b_0,$$

wobei $E_0\, b_0$ bezw. $E_0'\, b_0$ die wattlose Komponente und $E_0\, g_0$ bezw. $E_0'\, g_0$ die Wattkomponente des Magnetisierungsstromes bedeuten, so

sieht man, dass die Einphasenasynchronmaschine durch die in Fig. 12 dargestellte Schaltung ersetzt werden kann.

Fig. 12.



Betrachtet man die Maschine bei kleiner Schlüpfung s, so ist annähernd:

$$Y_2' = \frac{1}{\frac{r_2}{2-s} - j\,x_2} = \frac{1}{\frac{r_2}{2} - j\,x_2} = g_2' + j\,b_2',$$

wobei

$$g_2' = \frac{\frac{r_2}{2}}{\left(\frac{r_2}{2}\right)^2 + x_2^2},$$

$$b_2' = \frac{x_2}{\left(\frac{r_2}{2}\right)^2 + x_2^2}.$$

Die dem invers rotierenden Felde entsprechende Parallelschaltung hat dann die konstante Admittanz:

$$Y_2' + Y_0 = g_2' + g_0 + j\,(b_2' + b_0).$$

Die entsprechende Impedanz ist:

$$Z' = \frac{g_2' + g_0}{(g_2' + g_0)^2 + (b_2' + b_0)^2} - j\,\frac{b_2' + b_0}{(g_2' + g_0)^2 + (b_2' + b_0)^2} = r' - j\,x'.$$

In dieser vereinfachten Gestalt ist die Ersatzschaltung in Fig. 13 abgebildet.

Man kann sich somit die Wirkung des invers rotierenden Feldes bei kleiner Schlüpfung s durch eine konstante primäre Impedanz Z' ersetzt denken.

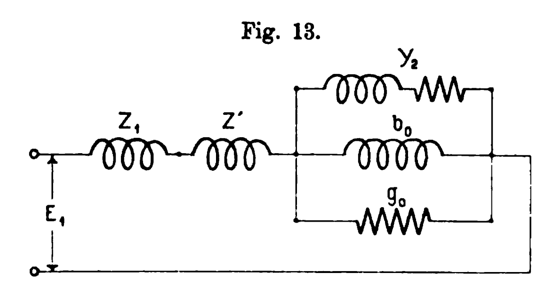
Der Einfluss der höheren Feldharmonischen ist bei der Einphasenmaschine in derselben Weise zu berücksichtigen, wie bei der Mehr-

phasenmaschine. Bei dieser letzteren hatten dieselben sehr angenähert dieselbe Wirkung als eine zusätzliche primäre Reaktanz von der Grösse:

$$\frac{\Sigma K_m f_m}{b_0 K_1 f_1}.$$

Bei der Einphasenmaschine ist hierbei zu bedenken, dass für jedes m zwei Feldharmonische auftreten, und zwar die eine nach rechts

Fig. 13.



und die andere nach links rotierend. Die zusätzliche Reaktanz der höheren Feldharmonischen ist deshalb in der Mehrphasenmaschine:

$$\frac{2 \Sigma K_m f_m}{b_0 K_1 f_1}.$$

In der Ausrechnung der Summe $\Sigma K_m f_m$ sind hier alle ungeraden m mitzunehmen.

6. Einfluss der Kurvenform des zugeführten Stromes.

Ist der zugeführte Strom nicht, wie bis jetzt angenommen, von Sinusform, so kann man für jede Harmonische desselben in der gleichen Weise, wie oben gezeigt, einen Ersatzstromkreis sich denken. Der Einfachheit wegen denken wir uns den streng richtigen Ersatzstromkreis auf die angenäherte Schaltung reduziert und betrachten dieselbe beim Durchschicken einer n-fachen Harmonischen des Stromes.

Der Ausdruck für die Impedanz der Primärwickelung wird

$$Z_{1n} = r_1 - j n x_1.$$

Weil hier r_1 klein ist gegenüber x_1, so wird die primäre Impedanz der Maschine der n^{ten} Harmonischen gegenüber dem absoluten Betrage nach etwa auf das n-fache erhöht. Der Ohmsche Widerstand bleibt dabei konstant.



In dem für die erste Stromharmonische geltenden Ausdruck für die durch die höheren Feldharmonischen erzeugte Reaktanz

$$\Sigma x_m' = \frac{1}{K_1 f_1} \Sigma \frac{K_m f_m}{\frac{p_2}{p_1} \frac{K_m' f_m'}{K_1 f_1} \frac{w_2^2}{w_1^2} \frac{1}{x_2} + b_{01}}$$

muss, wenn derselbe auf die n^{te} Stromharmonische übertragen werden soll, statt

$$x_2 \quad n\, x_2$$

und statt

$$b_{01} \quad \frac{1}{n} b_{01}$$

eingeführt werden. Diese Reaktanz ist also auch auf das n-fache zu erhöhen.

In den parallelen Zweigen g_0 und b_0 (Fig. 8), welche den Erregerstromkreis repräsentieren, muss mit Rücksicht auf die n^{te} Stromharmonische für g_0 und b_{01} bezw. eingeführt werden

$$\frac{g_0}{0{,}6\, n} \quad \text{und} \quad \frac{b_{01}}{n}.$$

Weil hier g_0 sehr klein ist im Verhältnis zu b_{01}, so ist die aus den beiden Zweigen resultierende Admittanz Y_{01} sehr nahe auf $\frac{1}{n}$ verkleinert. Oder was dasselbe ist, die Impedanz dieser Parallelschaltung ist auch auf das n-fache vergrössert.

Wir betrachten endlich den Stromzweig mit der Admittanz $\frac{1}{a_1} Y_{21}$. Hier ist a_1 eine Konstante, die von n unabhängig ist.

$$\frac{1}{Y_{21}} = \rho_1 - j\, x_2,$$

$$\rho_1 = \frac{r_2}{s_1}.$$

Für die n^{te} Stromharmonische muss gesetzt werden statt

$$x_2 \quad n\, x_2$$

und statt

$$\rho_1 \quad \rho_n = \frac{r_2}{s_n},$$

wobei

$$s_n = \frac{\pm\, n\, \omega_1 - \omega^0}{n\, \omega_1},$$

$$\omega^0 = \omega_1 (1 - s_1),$$

$$s_n = \frac{\pm n - 1 + s_1}{n},$$

also

$$\rho_n = \frac{n r_2}{\pm n - 1 + s_1}.$$

Die Impedanz dieses Zweiges ist also

$$\rho_n - j n x_2 = n \left(\frac{r_2}{\pm n - 1 + s_1} - j x_2 \right).$$

Für n ist das positive oder das negative Zeichen einzuführen, je nachdem, ob die n^{te} Stromharmonische denselben oder den entgegengesetzten Rotationssinn von der ersten Stromharmonischen hat.

Hieraus sieht man, dass man die Impedanz aller Zweige der Ersatzschaltung gegenüber der n^{ten} Stromharmonischen erhält, wenn man die Impedanzen der Zweige gegenüber der Grundschwingung bei der Schlüpfung $\pm n - 1 + s_1$ mit n multipliziert. Das Verhältnis zwischen Spannung und Strom ist somit bei der n-fachen Harmonischen n-mal so gross als das Verhältnis zwischen Spannung und Strom für die Grundschwingung des Stromes bei der Schlüpfung $\pm n - 1 + s_1$. Dies Verhältnis ist auch annähernd n-mal dem Verhältnis zwischen Kurzschlussspannung und Kurzschlussstrom der Maschine.

7. Die Form des Sekundärstromes.

Es ist interessant, die Kurvenform des Sekundärstromes der asynchronen Maschinen etwas näher zu betrachten. Zuerst soll der Primärstrom als sinusförmig angenommen werden. Die Schlüpfung der Sekundärwickelung in Bezug auf die m^{te} Harmonische des Feldes ist dann wie gezeigt

$$s_m = \pm 1 - m + m s_1,$$

wo s_1 die Schlüpfung der Sekundärwickelung in Bezug auf die Grundwelle des Feldes bedeutet. Die Winkelgeschwindigkeit der Grundschwingung des Sekundärstromes ist

$$\omega_1^0 = s_1 \omega_1,$$

wo ω_1 die Winkelgeschwindigkeit des Primärstromes bedeutet. Ebenso ist die Winkelgeschwindigkeit der m^{ten} Schwingung des Sekundärstromes

$$\omega_m^0 = s_m \omega_1 = \frac{s_m}{s_1} \omega_1^0,$$

wo

$$\frac{s_m}{s_1} = \frac{\pm 1 - m}{s_1} + m.$$

Dies Verhältnis ist im allgemeinen keine ganze Zahl. Es besteht somit zwischen den Winkelgeschwindigkeiten der einzelnen Schwingungen des Sekundärstromes bei einem sinusförmigen Primärstrom kein einfaches Verhältnis. Der Sekundärstrom besteht also im allgemeinen nicht aus harmonischen Schwingungen und kann nicht als ein periodischer Wechselstrom im gewöhnlichen Sinne aufgefasst werden.

Nehmen wir nun zweitens an, dass der Primärstrom kein reiner Sinusstrom sei, sondern eine höhere Harmonische, z. B. eine n^{te} Harmonische besitze. Wir wollen die Schwingungen im Sekundärstrome betrachten, welche hervorgerufen werden einmal von dem Grundton ($n = 1$) des Primärstromes und zweitens von der n^{ten} Harmonischen desselben; dabei sollen diejenigen Schwingungen betrachtet werden, welche mittels der m^{ten} Harmonischen des Feldes von der primären auf die sekundäre Wickelung übertragen werden.

Wie oben ist die Schlüpfung der $1\,m^{ten}$ Feldharmonischen

$$s_m = \pm 1 - m + m\,s_1$$

und die Winkelgeschwindigkeit der entsprechenden Schwingung des Sekundärstromes

$$\omega_m{}^0 = s_m\,\omega_1.$$

Dagegen ist, wie früher gezeigt, die Schlüpfung in Bezug auf die $n\,m^{te}$ Feldharmonische

$$s_{nm} = \pm 1 - \frac{m}{n} + \frac{m}{n}\,s_1$$

und die Winkelgeschwindigkeit der entsprechenden sekundären Schwingung

$$\omega_{nm}{}^0 = s_{nm}\,\omega_1.$$

Hieraus folgt

$$\frac{\omega_{nm}{}^0}{\omega_m{}^0} = \frac{s_{nm}}{s_m} = \frac{\pm 1 - \frac{m}{n} + \frac{m}{n}\,s_1}{\pm 1 - m + m\,s_1}.$$

Dies Verhältnis ist im allgemeinen keine ganze Zahl, sondern ein von der Grösse der Schlüpfung s_1 abhängiger Bruch.

Die n^{te} Harmonische des Primärstromes erzeugt somit keine n^{te} Harmonische im Sekundärstrom; sondern die von einer Harmonischen im Primärstrom erzeugte Schwingung des Sekundärstromes hat eine

von der Schlüpfung s_1 abhängige Periodenzahl, welche im allgemeinen in keinem einfachen Verhältnis zu der Periodenzahl der Grundschwingung steht.

Hieraus sieht man, dass es vergebliche Mühe ist, wenn man, wie es oft geschieht, die Stromkurve der sekundären Ströme punktweise mit einer Joubertschen Scheibe, die einmal pro Periode der Grundschwingung Kontakt macht, aufnehmen will; denn die Bedingung für die Anwendbarkeit dieser Methode besteht darin, dass die Stromwelle aus Harmonischen zusammengesetzt ist. Dies ist mit der Stromwelle im sekundären Teil einer Asynchronmaschine, wie gezeigt, nicht der Fall. Macht nämlich die Scheibe pro Periode der Grundschwingung einen Kontakt, so haben die höheren Schwingungen des Stromes in diesen Momenten jedesmal verschiedene Werte. Wir bekommen somit nicht bei jedem Kontakt denselben Momentanwert; sondern derselbe setzt sich aus einem von der ersten Sinusschwingung herrührenden konstanten, und einem von allen höheren Schwingungen herrührenden veränderlichen Wert zusammen. Das Mittel aus den Momentanwerten über eine genügend lange Zeit gibt nur den Momentanwert der ersten Sinusschwingung, weil das Mittel der höheren Schwingungen gleich Null ist.

8. Beispiele von Wickelungsfaktoren.

Der Einfluss der Wickelung auf das Verhalten der asynchronen Maschinen kann, wie gezeigt, durch die folgenden Wickelungsfaktoren ausgedrückt werden:

K_1 = E.M.K.-Faktor in Bezug auf die erste Feldharmonische,
f_1 = A.W.-Faktor in Bezug auf die erste Feldharmonische,
$\Sigma K_m f_m$ = für alle höheren Feldharmonischen.

Im folgenden sollen diese Faktoren für die gewöhnlichsten Arten der Dreiphasen-, Zweiphasen- und Einphasenwickelungen angegeben werden.

a) Dreiphasenwickelungen.

S. 293 und 298 sind die allgemeinen Formeln für die E.M.K.- und A.W.-Faktoren eines p-Phasensystems gegeben. Dieselben sind

$$K_m = \frac{\sin m \frac{2\pi}{4p}}{s \sin m \frac{2\pi}{4ps}}$$

und

$$f_m = \frac{8}{\pi^2} \frac{1}{m^2} \frac{\sin m \frac{2\pi}{4p}}{s \sin m \frac{2\pi}{4ps}}.$$

Für eine Dreiphasenwickelung ist $p = 3$ zu setzen, und wir bekommen für eine s-Lochwickelung

$$K_1 = \frac{\sin \frac{2\pi}{12}}{s \sin \frac{2\pi}{12s}},$$

$$f_1 = \frac{8}{\pi^2} \frac{\sin \frac{2\pi}{12}}{s \sin \frac{2\pi}{12s}},$$

$$\Sigma K_m f_m = \frac{8}{\pi^2} \frac{1}{s^2} \Sigma \frac{\sin^2 m \frac{2\pi}{12}}{m^2 \sin^2 m \frac{2\pi}{12s}}.$$

Bei der Summation sind durch drei teilbare m wegzulassen.

In der folgenden Tabelle sind die Faktoren für verschiedene Lochzahlen s ausgerechnet. Man sieht, dass durch die Vergrösserung der Lochzahl s die Summation $\Sigma K_m f_m$ bedeutend verkleinert wird, so dass die durch die höheren Feldharmonischen erzeugte zusätzliche Reaktanz

$$\frac{\Sigma K_m f_m}{b_1 K_1 f_1}$$

dadurch ebenfalls verringert wird. Durch die Vergrösserung der Lochzahl werden aber auch die Faktoren K_1 und f_1 verkleinert, was ein Nachteil ist, weil dadurch sowohl der Leerlaufstrom wie die Nutenreaktanz vermehrt werden.

Faktoren der Dreiphasenwickelungen.

s	K_1	f_1	$\Sigma K_m f_m$
1	1,0	0,81	0,0785
2	0,963	0,784	0,023
3	0,960	0,777	0,0104
4	0,958	0,775	0,0048
5	0,956	0,773	0,0035

b) Zweiphasenwickelungen.

Für $p = 2$ in den allgemeinen Formeln bekommt man

$$K_1 = \frac{\sin \frac{2\pi}{8}}{s \sin \frac{2\pi}{8s}},$$

$$f_1 = \frac{8}{\pi^2} \frac{\sin \frac{2\pi}{8}}{s \sin \frac{2\pi}{8s}},$$

$$\Sigma K_m f_m = \frac{8}{\pi^2} \frac{1}{s^2} \Sigma \frac{\sin^2 m \frac{2\pi}{8}}{m^2 \sin^2 m \frac{2\pi}{8s}},$$

wo die Summation für alle ungeraden m auszuführen ist. In der Tabelle sind die Werte für einige Lochzahlen s zusammengestellt.

Faktoren der Zweiphasenwickelungen.

s	K_1	f_1	$\Sigma K_m f_m$
1	1,0	0,81	0,19
2	0,924	0,747	0,058
3	0,91	0,737	0,039
4	0,905	0,735	0,022
5	0,903	0,731	0,018

c) Einphasenwickelungen.

In einer Einphasenwickelung seien in der Arbeitsphase s_1 und in der Anlaufsphase s_2 Löcher pro Pol vorhanden. Im ganzen seien also pro Pol $s = s_1 + s_2$ gleich weit voneinander entfernte Löcher vorhanden. Es lassen sich dann genau in gleicher Weise, wie schon gezeigt, die folgenden Formeln ableiten:

$$K_1 = \frac{\sin 2\pi \frac{s_1}{4s}}{s_1 \sin 2\pi \frac{1}{4s}},$$

$$f_1 = \frac{8}{\pi^2} \frac{1}{s_1} \frac{\sin 2\pi \frac{s_1}{4s}}{\sin 2\pi \frac{1}{4s}}$$

und

$$\Sigma K_m f_m = \frac{8}{\pi^2} \frac{1}{s_1^2} \Sigma \frac{\sin^2 m \frac{2\pi s_1}{4s}}{m^2 \sin^2 m \frac{2\pi}{4s}},$$

wo die Summation über alle ungeraden m auszuführen ist.

In der folgenden Tabelle sind die Faktoren für einige Lochzahlen s und s_1 aufgeführt. Für $s_1 = s_2 = \frac{s}{2}$ sind die Faktoren dieselben wie für die Zweiphasenwickelung. Diese Wickelungen sind deswegen hier nicht nochmals aufgeführt.

Faktoren der Einphasenwickelungen.

s	s_1	K_1	f_1	$\Sigma K_m f_m$
6	2	0,963	0,784	0,077
6	4	0,836	0,678	0,0011
15	5	0,956	0,773	0,045
15	10	0,828	0,671	0,0026
15	15	0,638	0,516	0,0054

Weil bei den Zwei- und Einphasenwickelungen keine ungeraden m herausfallen, wird bei denselben bei gleicher Lochzahl s stets die Summe $\Sigma K_m f_m$ grösser als bei den Dreiphasenwickelungen. Die Dreiphasenmaschinen sind deswegen in Bezug auf die Reaktanz der höheren Harmonischen des Feldes günstiger als die Zwei- und Einphasenmaschinen.

III. Das Stromdiagramm der asynchronen Motoren.

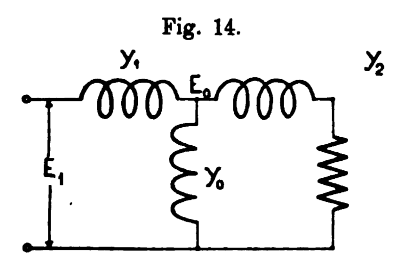
Einleitung.

Im vorhergehenden ist gezeigt worden, wie die Konstanten einer asynchronen Maschine von der Art der Wickelung und von der Phasenzahl abhängig sind, und wie sie auf die eine Wickelung, z. B. auf die primäre, reduziert werden können. Im folgenden wollen wir uns diese Reduktion, eventuell mit Berücksichtigung der Reaktanz der höheren

Feldharmonischen, vorgenommen denken. Eine asynchrone Mehrphasenmaschine lässt sich dann, wie zuerst von Steinmetz gezeigt, durch den in Fig. 14 dargestellten Stromkreis ersetzen. Wie früher gezeigt, ist dieselbe Ersatzschaltung zur Darstellung der Verhältnisse in einer asynchronen Einphasenmaschine, wenn dieselbe nahezu synchron läuft, ebenfalls anwendbar.

In der Ersatzschaltung (Fig. 14) ist bei Einphasen- und Mehrphasenmaschinen die sekundäre Admittanz Y_2 mit der Belastung veränderlich, und zwar beschreibt dieselbe, wie gezeigt, einen Kreis mit dem Durchmesser $\frac{1}{x_2}$, wobei x_2 gleich der sekundären Reaktanz ist. Die primäre Admittanz Y_1, welche mit Berücksichtigung der zusätzlichen Reaktanz der höheren Feldharmonischen erhalten ist, bleibt bei

Fig. 14.



Mehrphasenmaschinen bei allen Belastungen konstant. Bei Einphasenmaschinen dagegen, wo die primäre Admittanz Y_1 mit Berücksichtigung des invers rotierenden Feldes erhalten ist, ist diese Admittanz mit der Belastung etwas veränderlich. Für die im folgenden gegebene Ableitung des Stromdiagrammes der Maschinen, welche für Sinusform des zugeführten Stromes gilt, spielt jedoch diese Aenderung von Y_1 keine bedeutende Rolle, so dass die gegebenen Ausdrücke für das Stromdiagramm sowohl für Ein- als für Mehrphasenmotoren anwendbar sind.

Wir haben in komplexer Schreibweise:

Primäre Admittanz, eventuell mit Berücksichtigung der höheren Feldharmonischen und des invers rotierenden Feldes:

$$Y_1 = g_1 + j\,b_1.$$

Sekundäre Admittanz (auf die Primärwickelung reduziert):

$$Y_2 = g_2 + j\,b_2.$$

Admittanz des Magnetisierungsstromkreises (Erregeradmittanz):

$$Y_0 = g_0 + j\,b_0.$$

Resultierende Admittanz zwischen den primären Klemmen:

$$Y = g + jb.$$

Die Admittanzen Y_0 und Y_2, welche parallel geschaltet sind, addieren sich einfach, so dass wir schreiben können

$$Y' = Y_0 + Y_2 = g_0 + g_2 + j(b_0 + b_2) = g' + jb'.$$

Die resultierende Admittanz Y ist in komplexer Schreibweise:

$$Y = \frac{Y_1(Y_0 + Y_2)}{Y_1 + Y_0 + Y_2} = \frac{Y_1 Y'}{Y_1 + Y'},$$

$$g + jb = \frac{(g_1 + jb_1)(g' + jb')}{g_1 + jb_1 + g' + jb'}.$$

In dieser Gleichung muss das Reelle gleich dem Reellen und das Imaginäre gleich dem Imaginären sein, also

$$b(b_1 + b') - g(g_1 + g') = g_1 g' - b_1 b',$$
$$b(g_1 + g') + g(b_1 + b') = b_1 g' + g_1 b'.$$

Bestimmt man hieraus als Unbekannte b und g, so erhält man:

$$\left.\begin{aligned} b &= \frac{b' y_1^2 + b_1 y'^2}{y_1^2 + y'^2 + 2b_1 b' + 2g_1 g'} = \frac{b' y_1^2 + b_1 y'^2}{(b_1 + b')^2 + (g_1 + g')^2} \\ g &= \frac{g' y_1^2 + g_1 y'^2}{y_1^2 + y'^2 + 2b_1 b' + 2g_1 g'} = \frac{g' y_1^2 + g_1 y'^2}{(b_1 + b')^2 + (g_1 + g')^2} \end{aligned}\right\} \quad 1.$$

Durch Quadrieren und Addieren der beiden Gleichungen erhält man:

$$y^2 = \frac{y_1^2 y'^2}{y_1^2 + y'^2 + 2b_1 b' + 2g_1 g'} = \frac{y_1^2 y'^2}{(b_1 + b')^2 + (g_1 + g')^2} \quad 1a.$$

Hier bedeuten y, y_1 und y' die absoluten Werte der Admittanzen:

$$y = \sqrt{b^2 + g^2},$$
$$y_1 = \sqrt{b_1^2 + g_1^2},$$
$$y' = \sqrt{b'^2 + g'^2}.$$

Die Gleichungen 1 und 1a gestatten für jeden Fall, wenn die Komponenten b' und g' der parallel geschalteten Admittanzen y_0 und y_2 gegeben sind, die Komponenten b und g der resultierenden Admittanz zu berechnen.

Wünscht man umgekehrt die Gleichungen mit Rücksicht auf b' und g' als Unbekannte zu lösen, so kann man schreiben:

$$-b'(b - b_1) + g'(g - g_1) = b b_1 - g g_1,$$
$$b'(g - g_1) + g'(b - b_1) = -b g_1 - g b_1.$$

Hieraus erhält man:

$$\left.\begin{aligned} b' &= \frac{b y_1^2 - b_1 y^2}{y^2 + y_1^2 - 2 b b_1 - 2 g g_1} = \frac{b y_1^2 - b_1 y^2}{(b - b_1)^2 + (g - g_1)^2} \\ g' &= \frac{g y_1^2 - g_1 y^2}{y^2 + y_1^2 - 2 b b_1 - 2 g g_1} = \frac{g y_1^2 - g_1 y^2}{(b - b_1)^2 + (g - g_1)^2} \end{aligned}\right\} \quad 2.$$

Durch Quadrieren und Addieren der beiden Gleichungen erhält man:

$$y'^2 = \frac{y^2 y_1^2}{y^2 + y_1^2 - 2 b b_1 - 2 g g_1} = \frac{y^2 y_1^2}{(b - b_1)^2 + (g - g_1)^2} \quad 2a.$$

Hieraus kann umgekehrt, wenn die resultierende Admittanz y gegeben ist, die Admittanz y′ berechnet werden.

Eine derartige gegenseitige Zuordnung zweier Gebiete nennt man geometrisch eine Abbildung, und zwar ist die Abbildung der Y′-Ebene auf der Y-Ebene durch die Funktion

$$Y = \frac{Y_1 Y'}{Y_1 + Y'}$$

der komplexen Veränderlichen Y′ vermittelt. Umgekehrt ist die Abbildung der Y-Ebene auf der Y′-Ebene durch die Funktion

$$Y' = \frac{Y Y_1}{Y - Y_1}$$

der komplexen Veränderlichen Y vermittelt.

Es lässt sich zeigen, dass eine derartige Abbildung in den kleinsten Teilen ähnlich ist, weshalb sie auch konform genannt wird.

Nehmen wir in der Y′-Ebene die Susceptanzen b′ als Abscissen und die Konduktanzen g′ als Ordinaten, und ziehen wir eine Vertikale (b′ = konstant), so erhalten wir dementsprechend in der Y-Ebene als Abbildung den folgenden Kreis:

$$b^2 + b_1^2 - 2 b_1 b + g^2 + g_1^2 - 2 g_1 g = \frac{b}{b'} y_1^2 - \frac{b_1}{b'} y^2$$

oder

$$y^2 - 2 \frac{b_1 b' + \frac{1}{2} y_1^2}{b_1 + b'} b - 2 \frac{g_1 b'}{b_1 + b'} g = - \frac{b' y_1^2}{b_1 + b'} \quad . \quad 3.$$

Ziehen wir in der Y′-Ebene eine Horizontale (g′ = konstant), so erhalten wir ebenso

$$y^2 - 2 \frac{b_1 g'}{g_1 + g'} b - 2 \frac{g_1 g' + \frac{1}{2} y_1^2}{g_1 + g'} g = - \frac{g' y_1^2}{g_1 + g'} \quad . \quad 4.$$

Wir haben somit als Abbildung der Koordinaten der Y'-Ebene auf der Y-Ebene zwei Scharen von Kreisen. Weil die Abbildung konform ist, sind die Kreisscharen zu einander orthogonal.

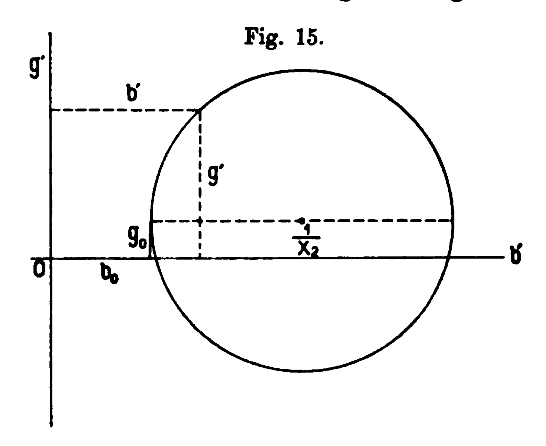
Das Gesetz, nach welchem Y' variiert, ist im vorhergehenden abgeleitet. Wir haben dabei die Eisenverluste berücksichtigt, indem wir gesetzt haben:

$$g_0 = \frac{W_0}{E_0^2},$$

wobei W_0 = Effektverlust im Eisen,
E_0 = Spannung an den Enden des Magnetisierungsstromkreises,
g_0 = Konduktanz des Magnetisierungsstromkreises.

Wir haben dann für Y' den in Fig. 15 dargestellten Kreis.

Fig. 15.



Die Kreisgleichung lautet:

$$\left[b' - \left(b_0 + \frac{1}{2x_2}\right)\right]^2 + (g' - g_0)^2 = \frac{1}{4x_2^2}$$

oder

$$y'^2 - 2b'\left(b_0 + \frac{1}{2x_2}\right) - 2g'g_0 = \frac{1}{4x_2^2} - g_0^2 - \left(b_0 + \frac{1}{2x_2}\right)^2$$

$$= -y_0^2 - \frac{b_0}{x_2}.$$

Hier führen wir die Werte von y', b' und g' aus den Gleichungen 2 und 2a ein und bekommen

$$y^2 y_1^2 - 2\left(b_0 + \frac{1}{2x_2}\right)(b y_1^2 - b_1 y^2) - 2g_0(g y_1^2 - g_1 y^2)$$

$$= -\left(y_0^2 + \frac{b_0}{x_2}\right)(y^2 + y_1^2 - 2bb_1 - 2gg_1).$$

Ordnet man diese Gleichung, erhält man eine solche von der Form

$$b^2 + g^2 - 2\beta b - 2\gamma g = -C^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5.$$

Hierin ist

$$\left.\begin{aligned} \beta &= \frac{1}{N}\left[b_1\left(y_0^2 + \frac{b_0}{x_2}\right) + y_1^2\left(b_0 + \frac{1}{2x_2}\right)\right] \\ \gamma &= \frac{1}{N}\left[g_1\left(y_0^2 + \frac{b_0}{x_2}\right) + y_1^2 g_0\right] \\ C^2 &= \frac{1}{N}\left[y_1^2\left(y_0^2 + \frac{b_0}{x_2}\right)\right] \\ N &= y_1^2 + y_0^2 + 2b_1 b_0 + 2g_1 g_0 + \frac{1}{x_2}(b_1 + b_0) \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad 6.$$

Die Gleichung 5 stellt den Kreis der resultierenden Admittanz y dar. Die Zentrumskoordinaten sind β und γ. Der Radius dieses Kreises sei mit R bezeichnet; dann ist

$$\begin{aligned} R^2 &= -C^2 + \beta^2 + \gamma^2 \\ &= \frac{1}{N^2}[-C^2N^2 + \beta^2N^2 + \gamma^2N^2]. \end{aligned}$$

Führt man die Werte aus den Gleichungen 6 ein, so ergibt sich nach einer kleinen Reduktion:

$$R^2 = \frac{y_1^4}{4x_2^2N^2},$$

$$R = \frac{y_1^2}{2x_2N} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 7.$$

Wenn wir den Radius $\frac{1}{2x_2}$ des ersten Admittanzkreises mit R′ bezeichnen, haben wir einfach

$$R = \frac{y_1^2}{N} R' \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 7a.$$

Durch die folgende Substitution lässt sich der Nennerausdruck N auf eine Form bringen, die einfacher und für die Konstruktion des Diagrammes sehr bequem ist.

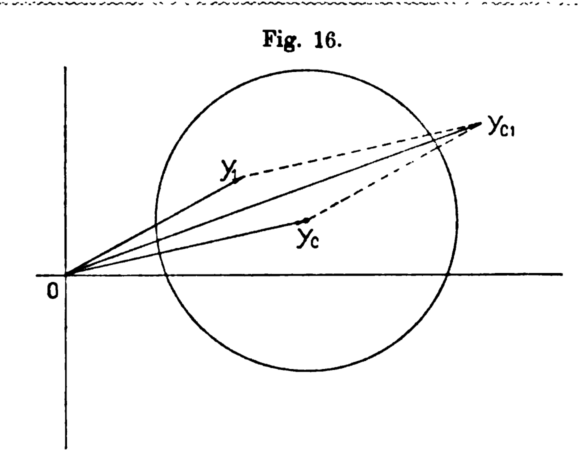
In der Fig. 16, welche den ersten Admittanzkreis vom Radius $R' = \frac{1}{2x_2}$ darstellt, sei die Admittanz des Kreismittelpunktes mit y_c bezeichnet, dann ist:

$$y_c^2 = b_c^2 + g_c^2,$$

wobei

$$b_c = b_0 + R'; \quad g_c = g_0.$$

Fig. 16.



Die geometrische Summe von y_c und der primären Admittanz y_1 wollen wir mit y_{c1} bezeichnen. Wir haben dann in dem Nennerausdruck

$$N = y_1^2 + y_0^2 + 2\,b_1 b_0 + 2\,g_0 g_1 + \frac{1}{x_2}(b_1 + b_0)$$
$$= (b_1 + b_0)^2 + (g_1 + g_0)^2 + \frac{1}{x_2}(b_1 + b_0),$$
$$b_0 = b_c - R'$$

und

$$g_0 = g_c$$

zu setzen. Es ergibt sich dann

$$N = (b_1 + b_c - R')^2 + (g_1 + g_c)^2 + 2\,R'(b_1 + b_c - R')$$
$$= (b_1 + b_c)^2 + (g_1 + g_c)^2 - R'^2,$$
$$N = y_{c1}^2 - R'^2 \quad \dots\dots\dots\dots\dots \quad 8.$$

Dies in Gleichung 7a eingesetzt, gibt für den Kreisradius R:

$$R = \frac{y_1^2}{y_{c1}^2 - R'^2}\,R' \quad \dots\dots\dots \quad 7b.$$

IV. Experimentelle Bestimmung der Konstanten eines fertigen Mehrphasenmotors.

Man bestimmt die Ohmschen Widerstände pro Phase der primären und der sekundären Wickelung beispielsweise durch Strom- und Spannungsmessung mit Gleichstrom. Der so gefundene Ohmsche Widerstand sei für die Primärwickelung gleich r_1 und für die Sekundärwickelung gleich r_2'. Der sekundäre Widerstand auf die primäre Wickelung reduziert ist dann

$$r_2 = a\,r_2'.$$

a) Leerlaufsversuch.

Das Uebersetzungsverhältnis a von der sekundären Wickelung auf die primäre ist wie erläutert:

$$a = \frac{K_1 f_1 w_1{}^2 p_1}{K_1' f_1' w_2{}^2 p_2}.$$

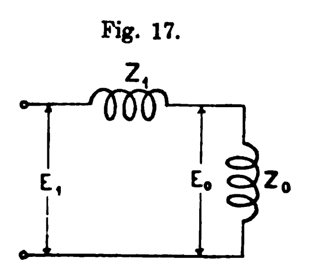
Hierbei bedeutet:

$\frac{p_1}{p_2} \frac{w_1}{w_2} \frac{f_1}{f_1'}$ das Uebersetzungsverhältnis der Ströme,

$\frac{w_1}{w_2} \frac{K_1}{K_1'}$ das Uebersetzungsverhältnis der E.M.Ke.

Wir führen dem Stator die Spannung E_1 und den Strom J_1 pro Phase zu und messen die induzierte E.M.K. in der offenen, stillstehenden Sekundärwickelung, dieselbe sei für eine Phase mit E_0' bezeichnet. Die Ersatzschaltung reduziert sich in diesem Falle auf den in Fig. 17 abgebildeten einfachen Stromkreis. Man hat also

Fig. 17.



$$E_1 = J_1 (Z_1 + Z_0),$$
$$E_0 = J_1 Z_0,$$

wobei Z_1 gleich der primären Impedanz der Maschine ist, eventuell mit Berücksichtigung der zusätzlichen Reaktanz der höheren Feldharmonischen.

$$Z_0 = \frac{1}{g_0 + j b_0}$$

ist die Erregerimpedanz der Maschine. Die E.M.K. E_0 ist gleich der sekundär gemessenen E.M.K., auf die Primärwickelung reduziert, somit

$$E_0 = \frac{w_1}{w_2} \frac{K_1}{K_1'} E_0'.$$

Hieraus hat man

$$\frac{E_0'}{E_1} = \frac{Z_0}{Z_1 + Z_0} \frac{w_2}{w_1} \frac{K_1'}{K_1} = c_1 \frac{w_2}{w_1} \frac{K_1'}{K_1},$$

wobei

$$c_1 = \frac{Z_0}{Z_1 + Z_0}$$

einen Faktor bedeutet, der nur wenig kleiner ist als 1, und durch den der Spannungsverlust in der primären Impedanz bei Leerlauf berücksichtigt wird.

Zweitens führen wir dem stillstehenden Rotor eine Spannung E_2 und einen Strom J_2 pro Phase zu, indem wir gleichzeitig die induzierte E.M.K. E_0 in einer primären Phase messen. Unter Berücksichtigung des Uebersetzungsverhältnisses hat man dann ähnlich wie oben:

$$\frac{E_0}{E_2} = \frac{Z_0}{Z_2 + Z_0} \frac{w_1}{w_2} \frac{K_1}{K_1'} = c_2 \frac{w_1}{w_2} \frac{K_1}{K_1'}.$$

Die Impedanz Z_2 der sekundären Wickelung ist hierbei auf die primäre Wickelung reduziert gedacht. Z_1 und Z_2 sind für gewöhnlich nahezu gleich, und diese beiden Impedanzen sind gegenüber der Impedanz Z_0 sehr klein. Wir können deshalb ohne merklichen Fehler

$$c_1 = c_2 = c$$

setzen, und erhalten dann:

$$c^2 = \frac{E_0' E_0}{E_1 E_2},$$

$$\frac{w_1^2}{w_2^2} \frac{K_1^2}{K_1'^2} = \frac{E_1 E_0}{E_0' E_2}.$$

Wie aus den abgeleiteten Formeln für die Wickelungsfaktoren K und f folgt (S. 299), ist

$$\frac{K_1}{K_1'} = \frac{f_1}{f_1'}.$$

Wir haben deshalb auch

$$\frac{w_1^2}{w_2^2} \frac{K_1 f_1}{K_1' f_1'} = \frac{E_1}{E_0'} \frac{E_0}{E_2}$$

und hieraus folgt das Uebersetzungsverhältnis

$$a = \frac{p_1}{p_2} \frac{w_1^2}{w_2^2} \frac{K_1 f_1}{K_1' f_1'} = \frac{p_1}{p_2} \frac{E_1}{E_0'} \frac{E_0}{E_2}.$$

Aus der ersten Leerlaufsmessung erhält man nun die Impedanz Z_0 dem absoluten Betrage nach, indem man setzt

$$\frac{w_1}{w_2} \frac{K_1}{K_1'} E_0' = \sqrt{\frac{E_1 E_0}{E_0' E_2}} E_0' = J_1 z_0,$$

$$z_0 = \sqrt{\frac{E_1 E_0}{E_0' E_2}} \frac{E_0'}{J_1}.$$

Messen wir bei der ersten Leerlaufsmessung nebenbei auch mit einem Wattmeter den in die eine Phase des Stators hineingeleiteten Effekt bei offener Sekundärwickelung und synchron rotierendem Rotor, so können wir die beiden Komponenten r_0 und x_0 von der Impedanz Z_0

bestimmen. Bezeichne W_1 den pro Phase hineingeleiteten Effekt bei Synchronismus, so ist

$$r_0 + r_1 = \frac{W_1}{J_1^2},$$

wo r_0 bestimmt werden kann, weil r_1 aus den Gleichstrommessungen bekannt ist. Aus der Impedanz

$$Z_0 = r_0 - j\,x_0$$

bestimmt sich leicht die Admittanz

$$Y_0 = g_0 + j\,b_0,$$

wo

$$g_0 = \frac{r_0}{z_0^2}, \qquad b_0 = \frac{x_0}{z_0^2}.$$

b) Kurzschlussversuch.

Wir schliessen den Rotor kurz und führen dem Stator Strom zu; gemessen wird der Strom $J_1{}^0$ und die Spannung $E_1{}^0$ pro Phase. Man hat dann die totale Impedanz

$$Z_1{}^0 = \frac{E_1{}^0}{J_1{}^0} = Z_1 + \frac{Z_0}{Z_2 + Z_0} Z_2 = Z_1 + c\,Z_2,$$

indem wir wie früher

$$\frac{Z_0}{Z_2 + Z_0} = c$$

setzen.

Zweitens schliessen wir den Stator kurz, führen dem Rotor Strom zu und messen $J_2{}^0$ und $E_2{}^0$ pro Phase. Bezeichnen wir die totale Impedanz zwischen den Enden einer Phase in diesem Falle mit $\frac{1}{a} Z_2{}^0$, so ist

$$a\,\frac{E_2{}^0}{J_2{}^0} = Z_2{}^0 = Z_2 + \frac{Z_0}{Z_1 + Z_0} Z_1 = Z_2 + c\,Z_1.$$

Ist $Z_1{}^0$ nahezu gleich $Z_2{}^0$, so ist auch Z_1 nahezu gleich Z_2 und wir können schreiben

$$Z_1 = Z_2 = \frac{Z_1{}^0}{1 + c} = \frac{Z_2{}^0}{1 + c}.$$

Hieraus sind die Impedanzen Z_1 und Z_2 mit genügender Annäherung bestimmt, und man erhält die Reaktanzen x_1 und x_2 aus den Beziehungen

$$x_1 = \sqrt{z_1^2 - r_1^2}, \qquad x_2 = \sqrt{z_2^2 - r_2^2},$$

wo r_1 und r_2 aus den Gleichstrommessungen bestimmt sind.

Endlich hat man nun

$$Y_1 = g_1 + j\,b_1,$$

wobei

$$g_1 = \frac{r_1}{z_1^2} \quad \text{und} \quad b_1 = \frac{x_1}{z_1^2}$$

und analog für

$$Y_2 = g_2 + j\,b_2.$$

c) Zahlenbeispiele.

Im folgenden soll die Anwendung der gegebenen Theorie auf einen praktischen Fall gezeigt werden. Zuerst wurden die Konstanten eines Drehstrommotors zu 5 PS. nach dem eben erläuterten Verfahren ermittelt und hieraus das kreisförmige Stromdiagramm des Motors berechnet; dann wurden durch Umrechnungen die Konstanten für denselben Motor beim Betrieb als Einphasenmotor ermittelt, und zwar einmal bei Serieschaltung von zwei und das andere Mal bei Serieschaltung von drei der primären Phasen. Aus den so erhaltenen Konstanten sind die kreisförmigen Stromdiagramme des Einphasenmotors für diese beiden Betriebsverhältnisse berechnet. Zur Kontrolle wurden auch die drei Stromdiagramme des Motors experimentell bestimmt. Als Belastung diente dabei ein Gleichstromgenerator, welcher auch als Motor laufen konnte, wodurch der Asynchronmotor in einen Asynchrongenerator überging. Hierdurch ging der früher als Stromquelle dienende Synchrongenerator in einen Synchronmotor über. Bei diesen verschiedenen Belastungszuständen wurde die Klemmenspannung der Asynchronmaschine und die Umdrehungszahl der Synchronmaschine (also die Periodenzahl des Stromes) konstant gehalten.

Ermittelung der Konstanten des Dreiphasenmotors.

Mittels Strom- und Spannungsmessung ergab sich für den Ohmschen Widerstand einer Phase:

$$\text{Primär} \quad r_1 = 0{,}27 \text{ Ohm},$$
$$\text{Sekundär} \quad r_2' = 0{,}114 \text{ „}$$

Weil, wie sich aus dem Folgenden ergibt, das Uebersetzungsverhältnis $a = 2{,}44$ ist, hat man den auf die Primärwickelung reduzierten Ohmschen Widerstand

$$r_2 = a\,r_2' = 0{,}28 \text{ Ohm}.$$

Es wurde ein Drehstrom von der Stärke J_1 und von der Spannung E_1 in jede Phase der Statorwickelung geleitet. Die Spannung

einer Phase der offenen, stillstehenden Rotorwickelung E_0' und der zugeführte Effekt W_1 pro Phase bei synchron laufendem Rotor wurden gemessen. Hierbei ergab sich:

$$J_1 = 4{,}9 \text{ Amp.},$$
$$E_1 = 111 \text{ Volt},$$
$$W_1 = 56 \text{ Watt},$$
$$E_0' = 68{,}5 \text{ Volt}.$$

Ein zweiter Leerlaufsversuch, wobei der Strom J_2 von der Spannung E_2 in jede Phase der Rotorwickelung hineingeleitet wurde, und wobei die Spannung einer Phase der offenen Statorwickelung E_0 betrug, ergab die folgenden Werte:

$$J_2 = 8{,}5 \text{ Amp.},$$
$$E_2 = 76{,}5 \text{ Volt},$$
$$E_0 = 115 \text{ ,,}$$

Aus diesen Messungen hat man, weil $p_1 = p_2 = 3$ ist:

$$a = \frac{E_1 E_0}{E_0' E_2} = \frac{111 \,.\, 115}{68{,}5 \,.\, 76{,}4} = 2{,}44,$$

$$c^2 = \frac{E_0' E_0}{E_1 E_2} = 0{,}935,$$

$$c = 0{,}966,$$

$$z_0 = \sqrt{a}\, \frac{E_0'}{J_1} = 1{,}56\, \frac{68{,}5}{4{,}9} = 21{,}8 \text{ Ohm},$$

$$r_1 + r_0 = \frac{W_1}{J_1^2} = \frac{56}{4{,}90^2} = 2{,}33 \text{ Ohm},$$

$$r_0 = 2{,}33 - 0{,}27 = 2{,}06 \text{ Ohm},$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} = 21{,}7 \text{ Ohm},$$

$$g_0 = \frac{r_0}{z_0^2} = 0{,}0043 \text{ Mho},$$

$$b_0 = \frac{x_0}{z_0^2} = 0{,}0458 \text{ Mho},$$

$$y_0 = \frac{1}{z_0} = 0{,}046 \text{ Mho}.$$

Ferner wurde bei kurz geschlossenem Rotor dem Stator ein Strom $J_1{}^0$ und eine Spannung $E_1{}^0$ pro Phase zugeführt. Hierbei ergab sich:

$$J_1{}^0 = 15{,}3 \text{ Amp.},$$
$$E_1{}^0 = 25{,}5 \text{ Volt}.$$

Hieraus hat man

$$z_1{}^0 = \frac{E_1{}^0}{J_1{}^0} = 1{,}67 = z_1 + c\,z_2.$$

Der Kontrolle wegen wurde dieser letztere Versuch noch von der Rotorseite des Motors ausgeführt, indem der Stator kurz geschlossen war und der Strom in den Rotor hineingeleitet wurde. Bei dieser Messung betrug

$$J_2{}^0 = 22{,}9 \text{ Amp.},$$
$$E_2{}^0 = 15{,}6 \text{ Volt},$$

woraus sich ergibt

$$z_2{}^0 = a\,\frac{E_2{}^0}{J_2{}^0} = 1{,}67 = z_2 + c\,z_1.$$

Man hat also hier einen Fall, wo

$$z_1 + c\,z_2 = z_2 + c\,z_1$$

oder

$$z_1 = z_2 = \frac{z_1{}^0}{1 + c} = 0{,}85 \text{ Ohm}.$$

Es findet sich nun weiter

$$x_1 = x_2 = \sqrt{z_1{}^2 - r_1{}^2} = 0{,}81 \text{ Ohm}$$

und hieraus die Leitfähigkeiten

$$g_1 = 0{,}371 \text{ Mho},$$
$$g_2 = 0{,}382 \text{ Mho},$$
$$b_1 = b_2 = 1{,}11 \text{ Mho},$$
$$y_1 = y_2 = 1{,}17 \text{ Mho}.$$

Die Primärwickelung des Motors hat 5 Nuten pro Pol und Phase. Nach der Tabelle S. 321 ist also für dieselbe

$$K_1 f_1 = 0{,}74,$$
$$\Sigma K_m f_m = 0{,}0035,$$

somit ist die von den höheren Feldharmonischen herrührende primäre Reaktanz:

$$x_1'' = \frac{\Sigma K_m f_m}{b_0 K_1 f_1} = \frac{0{,}0035}{0{,}0458 \,.\, 0{,}74} = 0{,}1 \text{ Ohm}$$

und

$$x_1 = x_1' + x_1'' = 0{,}71 + 0{,}1 = 0{,}81 \text{ Ohm}.$$

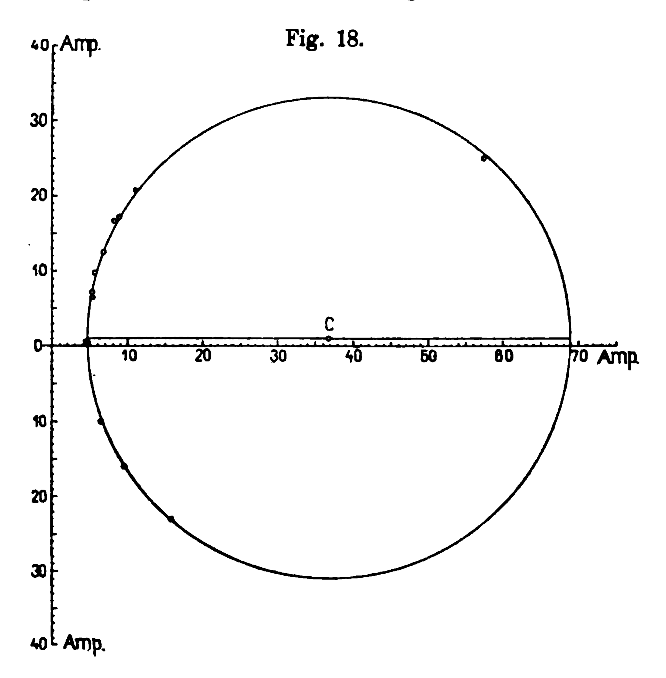
Aus diesen Konstanten ist das Admittanzdiagramm des Motors nach den Gleichungen 6 und 7 (S. 328) berechnet. Die Kreiskonstanten sind die folgenden:

Mittelpunktskoordinaten $\beta = 0{,}335$ Mho, $\gamma = 0{,}0096$ Mho,
Kreisradius $R = 0{,}291$ Mho.

Durch Multiplikation dieser Grössen mit der konstanten Klemmenspannung von 110 Volt pro Phase erhält man das Stromdiagramm der Maschine. In Fig. 18 ist dasselbe gezeichnet. Die experimentell gefundenen Punkte sind eingetragen; man sieht, dass dieselben mit genügender Genauigkeit mit dem berechneten Kreis übereinstimmen.

Es soll nun das Stromdiagramm desselben Motors als Einphasenasynchronmaschine untersucht werden und zwar zunächst für den Fall, dass alle drei primären Phasen in Serie geschaltet sind.

Fig. 18.



Für eine Einphasenwickelung mit $s = s_1 = 15$ ist nach der Tabelle S. 323

$$K_1 f_1 = 0{,}329,$$
$$\Sigma K_m f_m = 0{,}0054.$$

Wir bestimmen zuerst das neue Uebersetzungsverhältnis

$$a = \frac{K_1 f_1 p_1 w_1^2}{K_1' f_1' p_2 w_2^2},$$

was für den Dreiphasenmotor zu 2,44 gefunden wurde. Beim Betrieb als Einphasenmaschine haben wir w_1 zu verdreifachen, die Phasenzahl geht von 3 auf 1 herunter, und das Produkt der Wickelungsfaktoren änderte sich im Verhältnis $\frac{0{,}329}{0{,}74}$.

Folglich ist das neue Uebersetzungsverhältnis

$$a = 2{,}44 \, \frac{9}{3} \, \frac{0{,}329}{0{,}74} = 3{,}26.$$

Die reduzierten Konstanten sind nun:

Der primäre Widerstand

$$r_1' = 3 \, . \, 0{,}27 = 0{,}81 \text{ Ohm}.$$

Die primäre Reaktanz

$$x_1' = 3 \, . \, 0{,}71 = 2{,}13 \text{ Ohm}.$$

Die Erregersusceptanz

$$b_0 = \frac{2{,}44}{3{,}26} \, 0{,}0457 = 0{,}0342 \text{ Mho}.$$

Die Erregerkonduktanz

$$g_0 = \frac{2{,}44}{3{,}26} \, 0{,}0043 = 0{,}00324 \text{ Mho}.$$

Folglich ist die von den höheren Feldharmonischen herrührende primäre zusätzliche Reaktanz

$$x_1'' = \frac{2 \Sigma K_m f_m}{b_0 K_1 f_1} = \frac{2 \, . \, 0{,}0054}{0{,}0342 \, . \, 0{,}329} = 0{,}97 \text{ Ohm}.$$

Die sekundäre Reaktanz ist

$$x_2 = \frac{3{,}26}{2{,}44} \, 0{,}81 = 1{,}07 \text{ Ohm},$$

und die entsprechende Susceptanz

$$b_2 = \frac{2{,}44}{3{,}26} \, . \, 1{,}10 = 0{,}825 \text{ Mho}.$$

Ebenso ist der sekundäre Widerstand

$$r_2 = \frac{3{,}26}{2{,}44} \, 0{,}28 = 0{,}374 \text{ Ohm}$$

und die entsprechende Konduktanz

$$y_2 = \frac{2{,}44}{3{,}26} \, 0{,}382 = 0{,}286 \text{ Mho}.$$

Die dem invers rotierenden Felde entsprechenden Konstanten sind nun annäherungsweise (siehe S. 315)

$$g_2' = -\frac{\frac{r_2}{2}}{\left(\frac{r_2}{2}\right)^2 + x_2^2} = 0{,}158 \text{ Mho},$$

$$b_2' = \frac{x_2}{\left(\frac{r_2}{2}\right)^2 + x_2^2} = 0{,}91 \text{ Mho.}$$

Der von diesem Felde herrührende primäre Widerstand ist

$$r' = \frac{g_2' + g_0}{(g_2' + g_0)^2 + (b_2' + b_0)^2} = \frac{0{,}161}{0{,}911} = 0{,}177 \text{ Ohm}$$

und die entsprechende Reaktanz

$$x' = \frac{b_2' + b_0}{(g_2' + g_0)^2 + (b_2' + b_0)^2} = \frac{0{,}94}{0{,}911} = 1{,}03 \text{ Ohm.}$$

Der gesamte, für die Primärwickelung einzuführende Widerstand ist nun

$$r_1 = r_1' + r' = 0{,}81 + 0{,}177 = 0{,}99 \text{ Ohm,}$$

und die gesamte Primärreaktanz ist

$$x_1 = x_1' + x_1'' + x' = 2{,}13 + 0{,}97 + 1{,}03 = 4{,}13 \text{ Ohm.}$$

Die inversen Konstanten der Primärwickelung sind nun

$$y_1 = 0{,}2355 \text{ Mho,}$$
$$g_1 = 0{,}0548 \text{ „}$$
$$b_1 = 0{,}229 \text{ „}$$

Für die Konstanten des Admittanzkreises findet man nun durch Einsetzung der berechneten Werte in die Gleichungen 6 und 7 (S. 328):

$$\beta = 0{,}111 \text{ Mho,}$$
$$\gamma = 0{,}0064 \text{ „}$$
$$R = 0{,}0815 \text{ „}$$

Durch Multiplikation dieser Grössen mit der konstanten Klemmenspannung erhält man das Stromdiagramm des Einphasenmotors.

Dieser Kreis ist in Fig. 19 für 145 Volt gezeichnet. Die eingezeichneten Punkte, welche bei einer konstanten Klemmenspannung von 145 Volt experimentell aufgenommen wurden, zeigen eine gute Uebereinstimmung mit dem berechneten Kreise.

Als letztes Beispiel soll nun das Admittanzdiagramm desselben Drehstrommotors beim Betrieb als Einphasenmotor mit zwei primären Phasen in Serie entwickelt werden.

Für eine Einphasenwickelung mit $s = 15$ und $s_1 = 10$ ist nach der Tabelle S. 323

$$K_1 f_1 = 0{,}556,$$
$$\Sigma K_m f_m = 0{,}0026.$$

Bei der Bestimmung des neuen Uebersetzungsverhältnisses

$$a = \frac{K_1 f_1 p_1 w_1^2}{K_1' f_1' p_2 w_2^2},$$

was bei dem Dreiphasenmotor zu 2,44 gefunden wurde, haben wir w_1 zu verdoppeln; die Phasenzahl p_1 geht von 3 auf 1 herunter, und das Produkt der Wickelungsfaktoren ändert sich im Verhältnis

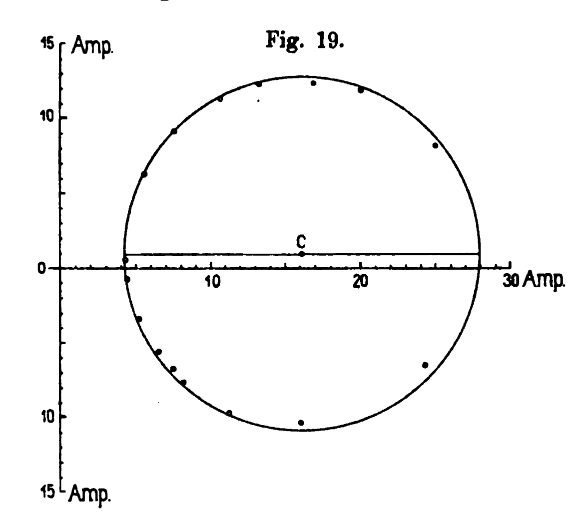
$$\frac{0{,}556}{0{,}74}.$$

Das neue Uebersetzungsverhältnis wird somit

$$a = 2{,}44 \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{0{,}556}{0{,}74} = 2{,}44.$$

Das Uebersetzungsverhältnis bleibt also in diesem Falle dasselbe wie bei dem Dreiphasenmotor.

Fig. 19.



Die reduzierten Konstanten sind nun die folgenden:

Der primäre Widerstand

$$r_1' = 2 \cdot 0{,}27 = 0{,}54 \text{ Ohm}.$$

Die primäre Reaktanz

$$x_1' = 2 \cdot 0{,}71 = 1{,}42 \text{ Ohm}.$$

Die Erregersusceptanz

$$b_0 = 0{,}0457 \text{ Mho}.$$

Die Erregerkonduktanz

$$g_0 = 0{,}00433 \text{ Mho}.$$

Die von den höheren Feldharmonischen herrührende zusätzliche primäre Reaktanz ist

$$x_1'' = \frac{2 \Sigma K_m f_m}{b_0 K_1 f_1} = \frac{2 \cdot 0{,}0026}{0{,}0457 \cdot 0{,}556} = 0{,}204 \text{ Ohm}.$$

Weil das Uebersetzungsverhältnis ungeändert bleibt, sind die sekundären Konstanten dieselben wie für den Dreiphasenmotor.

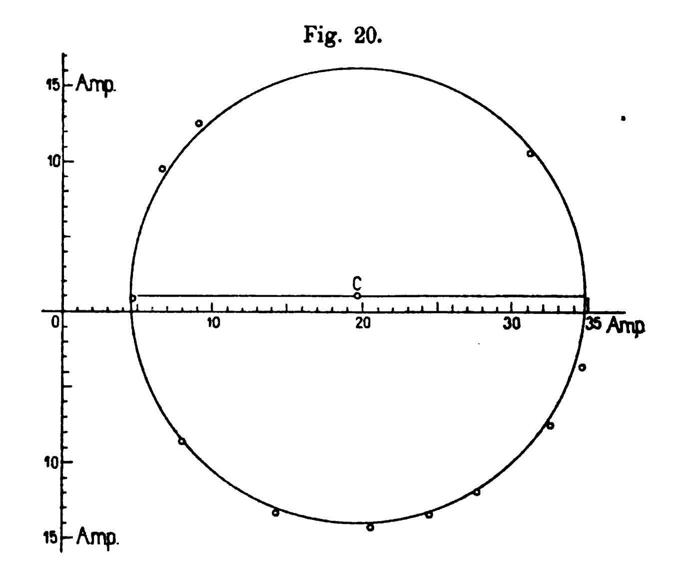
$$r_2 = 0{,}28 \text{ Ohm},$$
$$g_2 = 0{,}382 \text{ Mho},$$
$$x_2 = 0{,}81 \text{ Ohm},$$
$$b_2 = 1{,}10 \text{ Mho}.$$

Die dem invers rotierenden Felde entsprechenden Konstanten sind

$$g_2' = \frac{0{,}14}{0{,}14^2 + 0{,}81^2} = 0{,}207 \text{ Mho}.$$

$$b_2' = \frac{0{,}81}{0{,}14^2 + 0{,}81^2} = 1{,}19 \text{ Mho}.$$

Fig. 20.



Der von diesem Felde herrührende primäre Widerstand ist

$$r' = \frac{g_2' + g_0}{(g_2' + g_0)^2 + (b_2' + b_0)^2} = 0{,}134 \text{ Ohm},$$

und die entsprechende primäre Reaktanz

$$x' = \frac{b_2' + b_0}{(g_2' + g_0)^2 + (b_2' + b_0)^2} = 0{,}786 \text{ Ohm}.$$

Der gesamte, für die primäre Wickelung einzusetzende Widerstand ist somit

$$r_1 = r_1' + r' = 0{,}54 + 0{,}134 = 0{,}67 \text{ Ohm},$$

und die gesamte primäre Reaktanz ist

$$x_1 = x_1' + x_1'' + x' = 1,42 + 0,204 + 0,786 = 2,41 \text{ Ohm}.$$

Hieraus ergeben sich die inversen Primärkonstanten

$$y_1 = 0,403 \text{ Mho},$$
$$g_1 = 0,1075 \text{ „}$$
$$b_1 = 0,386 \text{ „}$$

Für die Konstanten des Admittanzkreises findet man durch Einsetzung der berechneten Werte in die Gleichungen 6 und 7 (S. 328):

Kreisradius $R = 0,137$ Mho,
Mittelpunktskoordinaten $\beta = 0,178$ Mho, $\gamma = 0,0097$ Mho.

Das entsprechende Stromdiagramm für eine Spannung von 110 Volt ist in Fig. 20 gezeichnet. Die eingezeichneten Punkte sind experimentell bei einer Spannung von 110 Volt aufgenommen. Die Uebereinstimmung ist, wie man sieht, eine genügende.

V. Darstellung der Verluste in einem Mehrphasenmotor.

Zur Darstellung der Verluste sollen, ähnlich wie bei Ossanna in seiner interessanten Arbeit über diesen Gegenstand (Z. f. E. 1899, S. 223 u. f.), gerade Linien benutzt werden. Diese Darstellungsweise lässt sich, wie gezeigt werden soll, auch in einfacher Weise auf die Verluste im Eisen verwenden.

a) Stromwärmeverlust in der primären Wickelung.

Bezeichnen wir mit W_1 den Effektverlust in der primären Wickelung, so ist

$$W_1 = J_1^2 r_1,$$

wobei J_1 die primäre Stromstärke, $r_1 = \frac{g_1}{y_1^2}$ den Widerstand der primären Wickelung bedeutet. Hier ist

$$J_1 = E_1 y,$$

wo E_1 die Klemmenspannung, y die resultierende Admittanz des Motors bezeichnet. Wir haben also auch

$$W_1 = E_1^2 r_1 y^2.$$

Nach Gleichung 5 (S. 328) ist aber

$$y^2 = 2\beta b + 2\gamma g - C^2,$$

also

$$W_1 = E_1^2 r_1 [2\beta b + 2\gamma g - C^2].$$

Bezeichnen wir zur Abkürzung den Wert

$$2\beta b + 2\gamma g - C^2 = L_1,$$

so können wir einfach schreiben

$$W_1 = E_1{}^2 r_1 L_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 9.$$

Betrachten wir b und g als veränderliche Grössen, so stellt die Gleichung

$$L_1 = 0$$

eine gerade Linie dar, die wir sofort zeichnen können. In Fig. 21 sei der Y-Kreis gezeichnet, sein Mittelpunkt sei c; aus der Gleichung der Linie $L_1 = 0$ sieht man, dass sie senkrecht steht auf der Geraden O c,

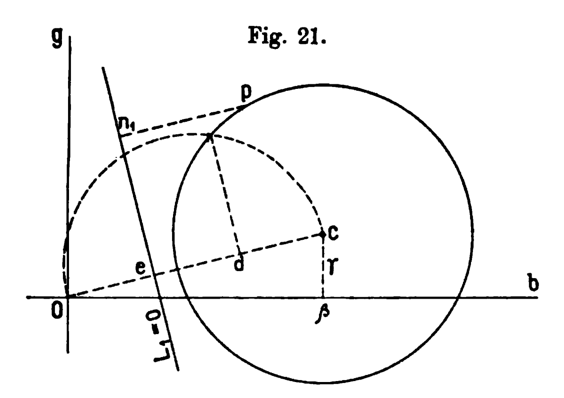


Fig. 21.

und dass ihr Abstand vom Punkte $O = \frac{1}{2} \frac{C^2}{Oc}$ ist. Zeichnet man über O c als Durchmesser einen Kreis, und zieht man von dem einen Schnittpunkte desselben mit dem Y-Kreis eine Normale zu O c, welche in d schneidet, so ist, wie leicht einzusehen

$$O d = \frac{C^2}{O c}.$$

Die Gerade $L_1 = 0$ schneidet somit O c senkrecht im Punkte e, wobei

$$O e = \frac{1}{2} = O d.$$

Der Wert des Ausdruckes

$$2\beta b + 2\gamma g - C^2 = L_1$$

für einen beliebigen Punkt p des Kreises mit den Koordinaten (b, g) ist nun nach einem bekannten Satze der analytischen Geometrie:

$$L_1 = 2\sqrt{\beta^2 + \gamma^2} \, . \, p n_1 = 2 O c \, . \, p n_1,$$

wobei $p n_1$ die Länge der Normale vom Punkte p auf die Linie $L_1 = 0$

bedeutet. Die Normale ist positiv zu nehmen, wenn p auf der entgegengesetzten Seite der Gerade von dem Punkte O liegt, sonst negativ.

Der primäre Stromwärmeverlust W_1 kann nun für jeden Punkt des Kreises gefunden werden:

$$W_1 = 20c \,.\, E_1^2 r_1 \,.\, p n_1 \quad \ldots\ldots \quad 10.$$

Eine andere und bequemere Darstellung der primären Verluste erhalten wir durch die folgenden Betrachtungen.

Setzen wir in der Gleichung 4 $g' = 0$, so bekommen wir die Gleichung eines Kreises. Dieser Kreis ist die Abbildung der Abscissen- oder b-Achse der Y'-Ebene in unserer Y-Ebene. Der Kreis hat die Gleichung

$$b^2 + g^2 - \frac{y_1^2}{g_1} g = 0 \quad \ldots\ldots \quad 11.$$

oder auch

$$b^2 + g^2 - \frac{1}{r_1} g = 0 \quad \ldots\ldots \quad 11a.$$

Verbinden wir diese Gleichung mit der Gleichung des Y-Kreises

$$b^2 + g^2 - 2\beta b - 2\gamma g = - C^2,$$

so bekommen wir

$$2\beta b + \left(2\gamma - \frac{1}{r_1}\right) g - C^2 = 0 \quad \ldots\ldots \quad 12.$$

Dies ist die Gleichung derjenigen geraden Linie, welche die Schnittpunkte der beiden betrachteten Kreise verbindet. Diese Schnittpunkte sind auch die Abbildungen der Schnittpunkte des Y'-Kreises mit der Abscissen- oder b-Achse.

Bezeichnen wir nun allgemein zur Abkürzung

$$2\beta b + \left(2\gamma - \frac{1}{r_1}\right) g - C^2 = L_1' \quad \ldots\ldots \quad 13.$$

so ist

$$L_1' = 0$$

die Gleichung der in Gleichung 12 dargestellten Geraden. Setzen wir

$$\frac{1}{r_1} g = L_b,$$

so stellt die Gleichung

$$L_b = 0$$

die Abscissenachse in der Y-Ebene dar. Nach Gleichung 12 ist nun

$$- L_1' = L_b - L_1 \quad \ldots\ldots \quad 14.$$

woraus man zunächst sieht, dass sich die beiden Geraden $L_1' = 0$ und $L_1 = 0$ auf der Geraden $L_b = 0$, d. h. auf der Abscissenachse, schneiden (siehe Fig. 22).

Multiplizieren wir die Gleichung 14 mit $E_1^2 r_1$, so kommt

$$-E_1^2 r_1 L_1' = E_1^2 r_1 L_b - E_1^2 r_1 L_1,$$

wobei

$$E_1^2 r_1 L_b = E_1^2 g = W$$

gleich dem zugeführten Effekt und

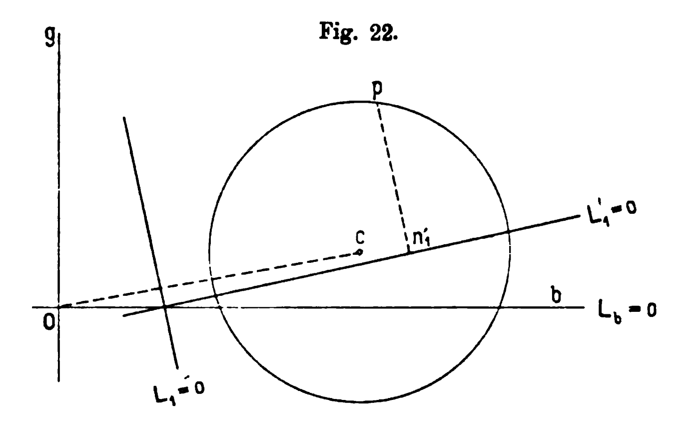
$$E_1^2 r_1 L_1 = W_1.$$

Folglich stellt

$$-E_1^2 r_1 L_1' = W - W_1 \quad \ldots \ldots \quad 15.$$

die Differenz zwischen dem zugeführten Effekt und dem Verlust in

Fig. 22.



der primären Wickelung dar. Ist p ein beliebiger Punkt des Y-Kreises und $p n_1'$ die Normale von demselben auf die Gerade $L_1' = 0$, so ist

$$-L_1' = 2\sqrt{\beta^2 + \left(\gamma - \frac{1}{2r_1}\right)^2} \cdot p n_1'$$

und folglich

$$W - W_1 = E_1^2 r_1 2 \sqrt{\beta^2 + \left(\gamma - \frac{1}{2r_1}\right)^2} \cdot p n_1' \quad \ldots \quad 16.$$

Der Abstand eines Kreispunktes von der Linie $L_1' = 0$ gibt also, wenn man den Massstab nach Gleichung 16 berücksichtigt, die Differenz zwischen dem zugeführten Effekt und dem primären Effektverlust.

Die Mittelpunktskoordinaten des in Gleichung 11a dargestellten Kreises sind $0, \frac{1}{2r_1}$; dieser Mittelpunkt sei mit M_1 bezeichnet. Es ist dann

$$\sqrt{\beta^2 + \left(\gamma - \frac{1}{2r_1}\right)^2} = M_1 c,$$

wobei $M_1 c$ den Abstand zwischen dem Mittelpunkte des Kreises um M_1

und demjenigen des Y-Kreises bedeutet. Man kann deswegen auch schreiben

$$W - W_1 = E_1^2 r_1 2 M_1 c \,.\, p n_1' \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 16a.$$

b) Eisenverluste im primären Teil.

Die auf den Erregerstromkreis g_0, b_0 (Fig. 14) wirkende Spannung sei E_0.

$$E_0 = E_1 - J Z_1 = E_1 (1 - Y Z_1)$$
$$= E_1 [1 - (g + j b)(r_1 - j x_1)]$$
$$= E_1 [1 - (g r_1 + b x_1) + j (b r_1 - g x_1)],$$
$$E_0^2 = E_1^2 \{[1 - (g r_1 + b x_1)]^2 + [b r_1 - g x_1]^2\}.$$

Hieraus erhält man

$$E_0^2 = E_1^2 (1 - 2 g r_1 - 2 b x_1 + z_1^2 y^2).$$

Der Eisenverlust ist

$$W_0 = E_0^2 g_0 = E_1^2 g_0 (1 - 2 x_1 b - 2 r_1 g + z_1^2 y^2).$$

Wenn wir y^2 nach Gleichung 5 einführen, erhalten wir

$$W_0 = E_1^2 g_0 [2 (z_1^2 \beta - x_1) b + 2 (z_1^2 \gamma - r_1) g + 1 - z_1^2 C^2]$$
$$= E_1^2 \frac{g_0}{y_1^2} [2 (\beta - b_1) b + 2 (\gamma - g_1) g + y_1^2 - C^2].$$

Hier setzen wir zur Abkürzung

$$2 (\beta - b_1) b + 2 (\gamma - g_1) g + y_1^2 - C^2 = L_0 \quad . \quad . \quad . \quad 17.$$

und haben dann einfach

$$W_0 = E_1^2 \frac{g_0}{y_1^2} L_0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 18.$$

Wir betrachten zuerst die gerade Linie, welche wir erhalten, wenn wir $L_0 = 0$ setzen.

In Fig. 23 ist c der Kreismittelpunkt mit den Koordinaten (β, γ). $O Y_1$ ist der primäre Admittanzvektor; die Koordinaten des Punktes Y_1 sind (b_1, g_1). Aus der Gleichung der Geraden $L_0 = 0$ sieht man sofort, dass die Gerade senkrecht auf die Richtung $c Y_1$ steht. Die Polare des Punktes Y_1 in Beziehung auf den Kreis

$$b^2 + g^2 - 2 \beta b - 2 \gamma g + C^2 = 0$$

hat die Gleichung

$$(\beta - b_1) b + (\gamma - g_1) g + \beta b_1 + \gamma g_1 - C^2 = 0.$$

Der Abstand dieser Geraden vom Punkte Y_1 ist

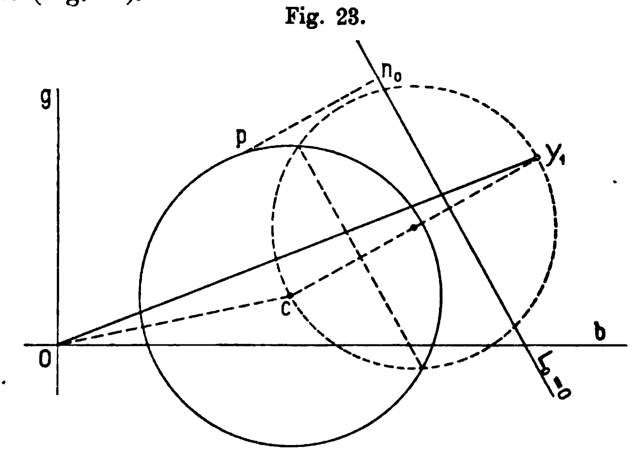
$$\frac{(\beta - b_1) b_1 + (\gamma - g_1) g_1 + \beta b_1 + \gamma g_1 - C^2}{\sqrt{(\beta - b_1)^2 + (\gamma - g_1)^2}} = \frac{2 \beta b_1 + 2 \gamma g_1 - y_1^2 - C^2}{Y_1 c},$$

wobei $Y_1 c$ den Abstand des Punktes Y_1 vom Mittelpunkt c des Y-Kreises bedeutet. Andererseits ist der Abstand der Geraden $L_0 = 0$ vom Punkte Y_1

$$\frac{2(\beta - b_1) b_1 + 2(\gamma - g_1) g_1 + y_1^2 - C^2}{2 . Y_1 c} = \frac{2\beta b_1 + 2\gamma g_1 - y_1^2 - C^2}{2 Y_1 c}.$$

Die Gerade $L_0 = 0$ steht somit halb so weit vom Punkte Y_1 entfernt wie die Polare zu diesem Punkte. Hieraus ergibt sich für die Gerade $L_0 = 0$ eine Konstruktion, welche derjenigen für die Gerade $L_1 = 0$ analog ist (Fig. 23).

Fig. 23.



Für einen beliebigen Punkt p des Y-Kreises sei der Abstand bis zur Geraden $L_0 = 0$ gleich $p n_0$, dann hat für diesen Punkt der Ausdruck L_0 den Wert

$$L_0 = p n_0 . 2 . c Y_1,$$

somit ist nach Gleichung 18 in diesem Punkte der Eisenverlust

$$W_0 = E_1^2 \frac{g_0}{y_1^2} L_0 = E_1^2 \frac{g_0}{y_1^2} . p n_0 . 2 c Y_1 \quad . \quad . \quad . \quad 19.$$

$c Y_1$ bedeutet wie früher den Abstand des Kreismittelpunktes c vom Punkte Y_1.

Wir können die Verluste im Eisen auch in einer anderen Weise zum Ausdruck bringen. In Fig. 24a und 24b sind die beiden Kreise, der Y'-Kreis und der Y-Kreis, nebeneinander gestellt. Die Schnittpunkte A und B der Geraden $L_1' = 0$ mit dem Y-Kreise sind die Abbildungen der Punkte A' und B' in der Y'-Ebene. Wir wollen nun die Abbildung der Geraden C'D' der Y'-Ebene suchen. Diese Gerade geht durch das Zentrum des Y'-Kreises in dem konstanten Abstande g_0

von der Abscissenachse. Die Abbildung wird erhalten, wenn wir in Gleichung 4 $g' = g_0$ setzen:

$$y^2 - 2\,\frac{b_1 g_0}{g_1 + g^0}\,b - 2\,\frac{g_1 g_0 + \frac{1}{2}\,y_1^2}{g_1 + g_0}\,g = -\,\frac{g_0 y_1^2}{g_1 + g_0} \quad . \quad 20.$$

Fig. 24a.

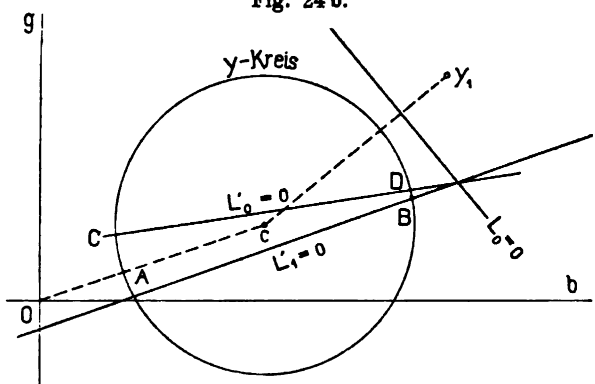
Diese Gleichung in Verbindung mit der Gleichung des Y-Kreises

$$y^2 - 2\beta\, b - 2\gamma\, g - C^2 = 0$$

liefert die folgende:

$$2\left(\frac{g_0 b_1}{g_1 + g_0} - \beta\right) b + 2\left(\frac{g_0 g_1 + \frac{1}{2}\,y_1^2}{g_1 + g_0} - \gamma\right) g - \frac{g_0 y_1^2}{g_1 + g_0} + C^2 = 0 \quad 21.$$

Fig. 24b.



Führen wir für die linke Seite dieser Gleichung die Abkürzung L_0' ein, so ist

$$L_0' = 0$$

die abgekürzte Gleichung der durch 21 dargestellten Geraden. Diese Gerade verbindet die Abbildungen C und D der beiden Punkte C′ und D′ (Fig. 24). Aus den Gleichungen 13, 17 und 21 hat man nun

$$\left.\begin{aligned} g_1 L_1' &= 2\beta g_1 b + (2\gamma g_1 - y_1^2) g - C^2 g_1 \\ g_0 L_0 &= 2(\beta g_0 - g_0 b_1) b + 2(\gamma g_0 - g_0 g_1) g + y_1^2 g_0 - C^2 g_0 \\ (g_1 + g_0) L_0' &= (2 g_0 b_1 - 2\beta g_1 - 2\beta g_0) b \\ &\quad + (2 g_0 g_1 + y_1^2 - 2\gamma g_1 - 2\gamma g_0) g - y_1^2 g_0 \\ &\quad + C^2 (g_1 + g_0). \end{aligned}\right\} \quad 22.$$

Also ist

$$(g_1 + g_0) L_0' = - g_1 L_1' - g_0 L_0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 23.$$

Hieraus ist zunächst ersichtlich, dass die Gerade $L_0' = 0$ durch den Schnittpunkt der beiden Geraden $L_1' = 0$ und $L_0 = 0$ geht (siehe Fig. 24b). Dividieren wir Gleichung 23 mit y_1^2, indem wir gleichzeitig den Wert von L_1' aus 14 einführen, so kommt

$$\frac{1}{y_1^2} (g_1 + g_0) L_0' = r_1 L_b - r_1 L_1 - \frac{g_0}{y_1^2} L_0 \quad . \quad . \quad . \quad 24.$$

Diese Gleichung mit E_1^2 multipliziert gibt

$$E_1^2 \frac{1}{y_1^2} (g_1 + g_0) L_0' = E_1^2 r_1 L_b - E_1^2 r_1 L_1 - E_1^2 \frac{g_0}{y_1^2} L_0.$$

Nach dem Früheren ist also

$$E_1^2 \frac{1}{y_1^2} (g_1 + g_0) L_0' = W - W_1 - W_0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 25.$$

Der Wert L_0' kann für jeden Punkt des Y-Kreises leicht graphisch bestimmt werden. Tragen wir nämlich von einem beliebigen Punkte p des Kreises eine Normale $p n_0'$ auf die Gerade $L_0' = 0$, so ist für diesen Punkt

$$L_0' = 2 \sqrt{\left[\frac{g_0 b_1}{g_1 + g_0} - \beta\right]^2 + \left[\frac{g_0 g_1 + \frac{1}{2} y_1^2}{g_1 + g_0} - \gamma\right]^2} \, . \, p n_0' \quad 26.$$

Nach Gleichung 20 sind die Mittelpunktskoordinaten des durch diese Gleichung dargestellten Kreises

$$\frac{b_1 g_0}{g_1 + g_0}, \quad \frac{g_1 g_0 + \frac{1}{2} y_1^2}{g_1 + g_0}.$$

Nennen wir diesen Mittelpunkt M_0, so können wir auch die Gleichung 25 schreiben

$$W - W_1 - W_0 = E_1^2 \frac{g_1 + g_0}{y_1^2} 2 M_0 c \, . \, p n_0' \quad . \quad . \quad 26a.$$

Hierbei bedeutet $M_0 c$ den Abstand zwischen dem Mittelpunkte des Kreises um M_0 und demjenigen des Y-Kreises.

Die Abstände der Punkte des Y-Kreises von der Geraden $L_0' = 0$ stellen somit in dem so definierten Massstabe jeweils den auf den Rotor übertragenen Effekt dar.

Hieraus ist, wie später gezeigt werden soll, das Drehmoment des Motors zu bestimmen.

c) Stromwärmeverlust in der sekundären Wickelung.

Bezeichne J_2 den Strom in der sekundären Wickelung, so ist zunächst in komplexer Schreibweise

$$J_2 = J_1 - E_0 Y_0,$$
$$E_0 = E_1 - J_1 Z_1 = E_1 (1 - Y Z_1),$$
$$J_1 = E_1 Y.$$

Folglich ist:

$$J_2 = E_1 (Y - Y_0 + Y Y_0 Z_1),$$

$$J_2 = E_1 [(g + jb)\{1 + (g_0 + j b_0)(r_1 - j x_1)\} - (g_0 + j b_0)]$$
$$= E_1 [g + jb + (g g_0 + j g b_0 + j b g_0 - b b_0)(r_1 - j x_1) - g_0 - j b_0]$$
$$= E_1 [g (1 + g_0 r_1 + b_0 x_1) - b (b_0 r_1 - g_0 x_1) - g_0$$
$$+ j\{b (1 + g_0 r_1 + b_0 x_1) + g (b_0 r_1 - g_0 x_1) - b_0\}].$$

Wenn wir jetzt auf den absoluten Betrag übergehen, so haben wir:

$$J_2^2 = E_1^2 [g^2 (1 + g_0 r_1 + b_0 x_1)^2 + b^2 (b_0 r_1 - g_0 x_1)^2 + g_0^2$$
$$+ b^2 (1 + g_0 r_1 + b_0 x_1)^2 + g^2 (b_0 r_1 - g_0 x_1)^2 + b_0^2$$
$$- 2 (g g_0 + b b_0)(1 + g_0 r_1 + b_0 x_1)$$
$$+ 2 (b g_0 - g b_0)(b_0 r_1 - g_0 x_1)]$$
$$= E_1^2 [y^2 \{(1 + g_0 r_1 + b_0 x_1)^2 + (b_0 r_1 - g_0 x_1)^2\} + y_0^2$$
$$- 2 (b_0 + x_1 y_0^2) b - 2 (g_0 + r_1 y_0^2) g],$$

$$J_2^2 = E_1^2 \{y^2 (1 + y_0^2 z_1^2 + 2 [g_0 r_1 + b_0 x_1]) - 2 (b_0 + x_1 y_0^2) b$$
$$- 2 (g_0 + r_1 y_0^2) g + y_0^2\}.$$

Infolge der Kreisgleichung ist aber

$$y^2 = - C^2 + 2 \beta b + 2 \gamma g.$$

Wenn wir dies einführen, bekommen wir:

$$J_2^2 = E_1^2 \{[\{1 + y_0^2 z_1^2 + 2 (g_0 r_1 + b_0 x_1)\} 2\beta - 2 (b_0 + x_1 y_0^2)] b$$
$$+ [\{1 + y_0^2 z_1^2 + 2 (g_0 r_1 + b_0 x_1)\} 2\gamma - 2 (g_0 + r_1 y_0^2)] g$$
$$+ y_0^2 - [1 + y_0^2 z_1^2 + 2 (g_0 r_1 + b_0 x_1)] C^2\} = E_1^2 L_2.$$

Wir dividieren und multiplizieren hier gleichzeitig mit y_1^2.

$$\left.\begin{aligned} J_2^2 = \frac{E_1^2}{y_1^2} \{[(y_1^2 + y_0^2 + 2[g_0 g_1 + b_0 b_1]) 2\beta \\ - 2(b_0 y_1^2 + b_1 y_0^2)] b + [(y_1^2 + y_0^2 + 2[g_0 g_1 + b_0 b_1]) 2\gamma \\ - 2(g_0 y_1^2 + g_1 y_0^2)] g - [y_1^2 + y_0^2 + 2(g_0 g_1 + b_0 b_1)] C^2 \\ + y_1^2 y_0^2\} = \frac{E_1^2}{y_1^2} [L_2 y_1^2]. \end{aligned}\right\} \quad 27.$$

Der sekundäre Effektverlust ist

$$W_2 = J_2^2 r_2 = E_1^2 r_2 L_2 \quad \ldots\ldots \quad 28.$$

Der Ausdruck

$$L_2 = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 29.$$

mit den veränderlichen b und g stellt eine gerade Linie dar, deren Verlauf wir zuerst untersuchen wollen.

Die Abbildung des Punktes C' der Y'-Ebene mit den Koordinaten b_0, g_0 sei C, derselbe habe die Koordinaten b_c, g_c. Der Punkt C ist dann der synchrone Punkt des Motors; y_c ist die Admittanz derselben bei offenem sekundärem Stromkreis oder bei Synchronismus. Mit Berücksichtigung der Transformationsgleichungen 1 und 1a können wir dann den Ausdruck L_2 schreiben:

$$\frac{1}{y_1^2}[(b_1+b_0)^2+(g_1+g_0)^2][2(\beta-b_c)b+2(\gamma-g_c)g-C^2+y_c^2]=L_2 \quad 30.$$

Hieraus sieht man zuerst, dass die Gerade $L_2 = 0$ durch den Punkt y_c geht; denn da

$$-b_c^2 - g_c^2 + 2\beta b_c + 2\gamma g_c - C^2 = 0,$$

so ist die Gleichung 30 für diesen Punkt erfüllt. Zweitens sieht man, dass der Abstand der Geraden $L_2 = 0$ vom Kreismittelpunkt (β, γ) gleich dem Kreisradius R ist. Der Abstand ist nämlich

$$\frac{2\beta^2 + 2\gamma^2 - 2\beta b_c - 2\gamma g_c - C^2 + b_c^2 + g_c^2}{2\sqrt{(\beta - b_c)^2 + (\gamma - g_c)^2}} = \frac{\beta^2 + \gamma^2 - C^2}{R} = R.$$

Die Gerade $L_2 = 0$ ist somit eine Tangente zum Y-Kreis, und zwar tangiert dieselbe den Kreis im synchronen Punkte C.

Bezeichne y_{01} die geometrische Summe der beiden Admittanzen y_0 und y_1, so ist

$$y_{01}^2 = (b_1 + b_0)^2 + (g_1 + g_0)^2.$$

Die Gleichung 30 kann also auch geschrieben werden:

$$\frac{y_{01}^2}{y_1^2}[2(\beta - b_c) b + 2(\gamma - g_c) g - C^2 - y_c^2] = L_2 \quad . \quad 30a.$$

Für einen Punkt des Y-Kreises p sei der Abstand zur Geraden $L_2 = 0$ mit $p n_2$ bezeichnet, dann ist für diesen Punkt

$$L_2 = \frac{y_{01}^2}{y_1^2} 2 R p n_2 \quad \ldots \ldots \ldots \quad 31.$$

Der sekundäre Stromwärmeverlust für diesen Punkt ist folglich

$$W_2 = E_1^2 r_2 L_2 = E_1^2 r_2 \frac{y_{01}^2}{y_1^2} 2 R p n_2 \quad \ldots \quad 32.$$

Wir können den Ausdruck $y_1^2 L_2$ noch auf eine für die Berechnung der Verluste bequemere Form bringen. Bezeichnen wir den Ausdruck zur Abkürzung

$$A_2 b + B_2 g - C_2 = L_2 y_1^2$$

und führen wir den in Gleichung 6 gegebenen Nennerwert N ein, so ist (siehe Gleichung 27)

$$\begin{aligned} A_2 &= \left[N - \frac{1}{x^2}(b_1 + b_0)\right] 2\beta - 2(b_0 y_1^2 + b_1 y_0^2) \\ &= 2\left[b_1\left(y_0^2 + \frac{b_0}{x_2}\right) + y_1^2\left(b_0 + \frac{1}{2 x_2}\right)\right] \\ &\quad - \frac{2}{x_2}(b_1 + b_0)\beta - 2 b_0 y_1^2 - 2 b_1 y_0^2 \\ &= \frac{1}{x_2}[2 b_1 b_0 + y_1^2 - 2\beta(b_1 + b_0)]. \end{aligned}$$

Ebenso erhält man

$$B_2 = \frac{1}{x_2}[2 g_1 b_0 - 2\gamma(b_1 + b_0)]$$

und

$$C_2 = \frac{1}{x_2}[b_0 y_1^2 - C^2(b_1 + b_0)].$$

Man hat also

$$\left.\begin{aligned} y_1^2 L_2 = \frac{1}{x_2}\{&[2 b_1 b_0 + y_1^2 - 2\beta(b_1 + b_0)] b \\ &+ [2 g_1 b_0 - 2\gamma(b_1 + b_0)] g \\ &- [b_0 y_1^2 - C^2(b_1 + b_0)]\} \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad 33.$$

Es soll nun auch für diesen Fall eine zweite Darstellungsart gegeben werden, welche gestattet, direkt die Differenz zwischen dem zugeführten Effekte und den Verlusten zu ermitteln.

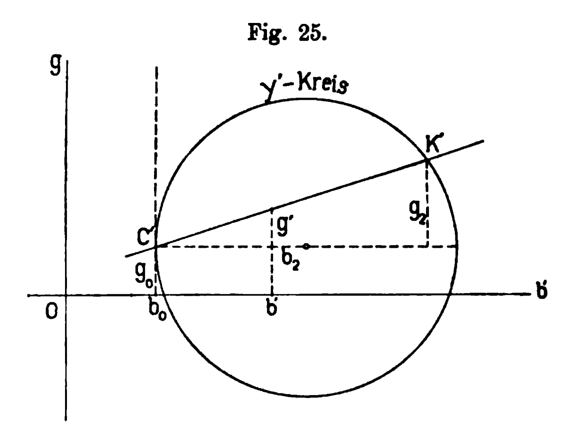
In Fig. 25 sei der erste Admittanzkreis oder der Y'-Kreis gezeichnet.

Die Gerade C'K' stelle den sekundären Admittanzvektor y_2 dar; die Koordinaten des Punktes K' sind dann $b_0 + b_2$, $g_0 + g_2$. K' ist der Kurzschlusspunkt. Die veränderlichen Koordinaten der Geraden C'K' seien b', g'. Die Gleichung der Geraden in dieser Y'-Ebene ist dann

$$g' - g_0 = \frac{g_2}{b_2}(b' - b_0).$$

Wir suchen die Abbildung dieser Geraden in der Y-Ebene; die ver-

Fig. 25.



änderlichen Koordinaten seien hier b, g. Die Werte von b' und g' aus den Transformationsformeln 2 eingesetzt liefern:

$$- g_1 y^2 + g_1 y_1^2 - g_0 [(b - b_1)^2 + (g - g_1)^2]$$
$$= \frac{g_2}{b_2}\{- b_1 y^2 + b y_1^2 - b_0 [(b - b_1)^2 + (g - g_1)^2]\}.$$

Hieraus bekommt man:

$$\left.\begin{aligned}&[-(g_1 + g_0)\, b_2 + (b_1 + b_0) g_2] y^2\\ &+ [-y_1^2 g_2 + 2 b_1 (g_0 b_2 - g_2 b_0)] b\\ &+ [y_1^2 b_2 + 2 g_1 (g_0 b_2 - g_2 b_0)] g\\ &- y_1^2 (g_0 b_2 - g_2 b_0) = 0\end{aligned}\right\} \quad . \;.\;.\quad 34.$$

Diese Kreisgleichung stellt in der Y-Ebene die Abbildung der Geraden C'K' der Y'-Ebene dar. Verbinden wir diese Gleichung mit der Kreisgleichung

$$y^2 = - C^2 + 2\beta b + 2\gamma g,$$

so bekommen wir den folgenden Ausdruck:

$$\left.\begin{array}{l}\{2\beta[-(g_1+g_0)b_2+(b_1+b_0)g_2]-y_1{}^2g_2+2b_1(g_0b_2-g_2b_0)\}b\\ +\{2\gamma[-(g_1+g_0)b_2+(b_1+b_0)g_2]+y_1{}^2b_2\\ \quad+2g_1(g_0b_2-g_2b_0)\}g-C^2[-(g_1+g_0)b_2+(b_1+b_0)g_2]\\ \quad-y_1{}^2(g_0b_2-g_2b_0)=0\end{array}\right\} \quad 35.$$

Die linke Seite des vorhergehenden Ausdruckes wollen wir allgemein mit

$$[-(g_1+g_0)b_2+(b_1+b_0)g_2]L_2'$$

bezeichnen. $L_2'=0$ stellt dann diejenige gerade Linie dar, welche den Punkt C mit dem Punkte K, d. h. den synchronen Punkt mit dem Kurzschlusspunkte verbindet.

Vergleicht man nun den Ausdruck 35 mit demjenigen für $(g_1+g_0)L_0'$ in 22 und mit dem für L_2 in 33, so sieht man, dass

$$\left.\begin{array}{l}[-(g_1+g_0)b_2+(b_1+b_0)g_2]L_2'\\ =b_2(g_0+g_1)L_0'-g_2x_2y_1{}^2L_2\\ =-b_2(g_0L_0+g_1L_1')-g_2x_2y_1{}^2L_2\\ =-b_2(g_0L_0+g_1L_1-g_1L_b)-g_2x_2y_1{}^2L_2\end{array}\right\} \quad .\;.\;.\quad 36.$$

Oder

$$\left.\begin{array}{l}[-(g_1+g_0)b_2+(b_1+b_0)g_2]\dfrac{L_2'}{b_2y_1{}^2}\\ =r_1L_b-r_1L_1-\dfrac{g_0}{y_1{}^2}L_0-\dfrac{g_2}{y_2{}^2}L_2\end{array}\right\} \quad .\;.\;.\;.\quad 36a.$$

Multiplizieren wir hier auf beiden Seiten mit $E_1{}^2$, so haben wir mit Rücksicht auf die Gleichungen 9, 18 und 28:

$$[-(g_1+g_0)b_2+(b_1+b_0)g_2]\frac{L_2'}{b_2y_1{}^2}E_1{}^2=W-W_1-W_0-W_2 \quad 37.$$

Bezeichne pn_2' die Länge der von einem Punkte p des Y-Kreises auf die Gerade $L_2'=0$ gefällte Normale, so ist für den Punkt p infolge Gleichung 35 der Wert L_2':

$$L_2'=2\sqrt{\left(\beta+\frac{-\frac{1}{2}y_1{}^2g_2+b_1(g_0b_2-g_2b_0)}{-(g_1+g_0)b_2+(b_1+b_0)g_2}\right)^2+\left(\gamma+\frac{\frac{1}{2}y_1{}^2b_2+g_1(g_0b_2-g_2b_0)}{-(g_1+g_0)b_2+(b_1+b_0)g_2}\right)^2}\,.\,pn_2'.$$

Mit Berücksichtigung der Gleichung 34 können wir dies schreiben:

$$L_2'=2\sqrt{(\beta-m)^2+(\gamma-n)^2}\,.\,p\,n_2',$$

wobei m, n die Mittelpunktskoordinaten des durch die Gleichung 34 dargestellten Kreises bedeuten. Bezeichnen wir diesen Mittelpunkt mit M_2' und ist $M_2'c$ die Verbindungslinie zwischen M_2' und dem Mittelpunkte c des Y-Kreises, so ist

$$L_2' = 2 M_2'c \,.\, p n_2' \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 38.$$

Folglich ist der vom Motor abgegebene Effekt

$$W' = E_1^2 \frac{1}{y_1^2} \left[\frac{g_2}{b_2} (b_1 + b_0) - (g_1 + g_0) \right] 2 M_2'c \,.\, p n_2' \quad . \quad 39.$$

Die Leistung des Motors ist somit in dem eben definierten Massstab durch den Abstand eines Punktes des Y-Kreises von der Geraden $L_2' = 0$, d. h. von der Verbindungslinie zwischen Kurzschluss- und Synchronpunkt, gegeben. Hierbei sind Verluste durch Lager-, Luft- und Bürstenreibung nicht berücksichtigt.

VI. Darstellung der Verhältnisse zwischen den Effekten.

a) Drehmoment.

Bezeichnen wir das Drehmoment des Motors in Kilogramm mal Metern mit D, die Winkelgeschwindigkeit des Wechselstromes mit ω und die halbe Polzahl des Motors mit p; die Winkelgeschwindigkeit des rotierenden Feldes ist dann $\frac{\omega}{p}$, und der auf den Rotor übertragene Effekt ist $D \frac{\omega}{p} 9{,}81$ Watt; dies muss gleich dem zugeführten Effekte minus den Verlusten im primären Teil des Motors sein. Wir haben also nach Gleichung 25:

$$D \frac{\omega}{p} 9{,}81 = W - W_1 - W_0 = E_1^2 \frac{1}{y_1^2} (g + g_0) L_0'$$

oder nach 26a:

$$D = E_1^2 \frac{p}{9{,}81 \, \omega \, y_1^2} (g_1 + g_0) \, 2 M_0 c \,.\, p n_0' \quad . \quad . \quad . \quad 40.$$

Die Abstände der Kreispunkte p von der Geraden $L_0' = 0$ sind somit in dem eben definierten Massstabe mit den Drehmomenten proportional.

Wir können auch das Drehmoment durch die folgende Ueberlegung ermitteln, wobei die Bestimmung des Massstabes wegfällt. Wir bilden das Verhältnis:

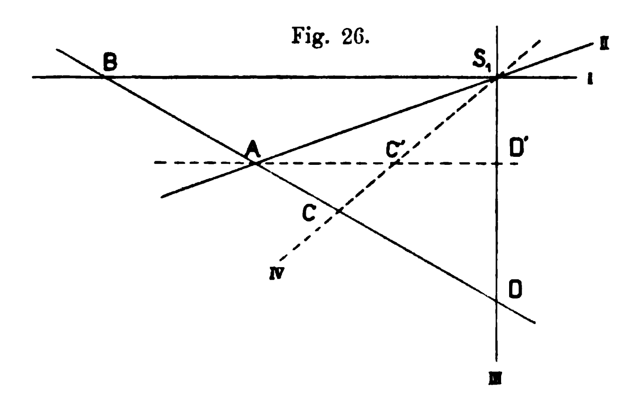
$$\vartheta = \frac{W - W_1 - W_0}{W} = \frac{(g_1 + g_0) L_0'}{g_1 L_b} \quad . \quad . \quad . \quad 41.$$

ϑ ist der Wirkungsgrad des primären Teils (Stators) des Motors. Für ein bestimmtes ϑ erhalten wir nun die Gleichungen der folgenden 4 Geraden:

$$\left.\begin{aligned} g_1 L_b &= 0 \quad \text{I.} \\ (g_1 + g_0) L_0' &= 0 \quad \text{II.} \\ g_1 L_b - (g_1 + g_0) L_0' &= 0 \quad \text{III.} \\ \vartheta g_1 L_b - (g_1 + g_0) L_0' &= 0 \quad \text{IV.} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad 42$$

Aus der Form dieser Gleichungen sieht man, dass die 4 Geraden sich in einem Punkte schneiden, und zwar liegt dieser Schnittpunkt auf der Abscissenachse, weil die erste Gleichung einfach die Abscissenachse darstellt. ϑ ist das Doppelverhältnis dieses Strahlenbündels.

Fig. 26.



Die letzte Gleichung drückt aus, dass der dem Motor zugeführte Effekt mal den primären Wirkungsgrad ϑ gleich ist dem auf den Rotor übertragenen Effekt. Diese Gerade muss folglich mit dem Y-Kreise denjenigen Punkt oder diejenigen Punkte gemeinschaftlich haben, für welche der primäre Wirkungsgrad ϑ ist. Diese Linie wird also durch den Kreispunkt gelegt, für den ϑ bestimmt werden soll.

In Fig. 26 sind die 4 sich schneidenden Geraden dargestellt. Dieselben werden durch eine Transversale in den 4 Punkten A, B, C und D geschnitten. Es ist dann nach einem bekannten Satze das Doppelverhältnis

$$\vartheta = \frac{A\,C : A\,D}{B\,C : B\,D}.$$

Geht die Transversale in eine Parallele zur Abscissenachse über, so geht das Doppelverhältnis in das einfache Verhältnis über:

$$\vartheta = \frac{A\,C'}{A\,D'}.$$

Teilen wir z. B. die Strecke A D′ in 100 Teile, so stellt uns der Punkt C′ direkt den Wirkungsgrad ϑ in Prozenten dar.

Die 4 Geraden, welche den Strahlenbündel bilden, sind uns schon bekannt bis auf die Gerade III, deren Gleichung ist:

$$g_1 L_b - (g_1 + g_0) L_0' = 0.$$

Diese Gerade können wir aber gleich bestimmen; setzen wir nämlich nach Gleichung 23:

$$(g_1 + g_0) L_0' = - g_1 L_1' - g_0 L_0$$

und nach Gleichung 14:

$$g_1 L_1' = g_1 L_1 - g_1 L_b,$$

so können wir die Gleichung der Geraden III schreiben:

$$g_1 L_1 + g_0 L_0 = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 43.$$

Die Gerade III geht somit durch den Schnittpunkt der beiden bekannten Geraden $L_1 = 0$ und $L_0 = 0$. Weil die Gerade ferner durch den bekannten Schnittpunkt des Strahlenbündels geht, so ist dieselbe vollständig bestimmt.

Der auf den Rotor übertragene Effekt ist nun für einen Punkt des Y-Kreises:

$$W - W_1 - W_0 = \vartheta W,$$

und das Drehmoment:

$$D = \frac{p}{9{,}81\,\omega} \vartheta W.$$

Man kann leicht die Strecke A D′ so teilen, dass einfach das Produkt aus dem bei C′ abgelesenen Wert und dem zugeführten Effekte W das Drehmoment ergiebt.

b) Schlüpfung.

Bezeichnen wir mit ω_2 die Winkelgeschwindigkeit der sekundären Wickelung, mit s die Schlüpfung, so hat man:

$$s = \frac{\omega - \omega_2}{\omega}.$$

Weil der elektrische Verlust im Rotor einem gleichen Verlust an mechanischer Leistung entsprechen muss, und weil der letztere nur ein Geschwindigkeitsverlust sein kann, muss

$$9{,}81\,D\,\frac{\omega - \omega_2}{p} = W_2 = 9{,}81\,D\,\frac{\omega}{p}\,\frac{\omega - \omega_2}{\omega}$$

oder

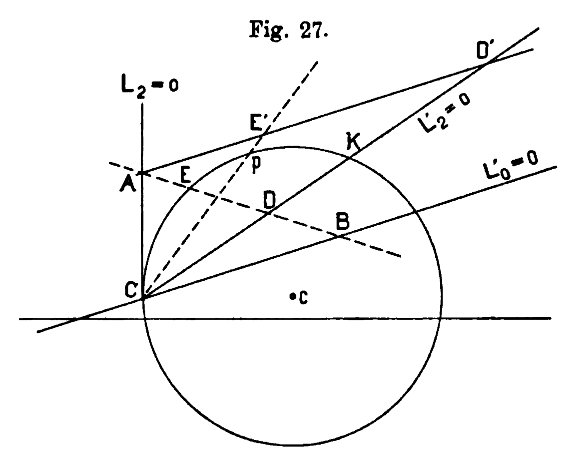
$$s = \frac{W_2}{9{,}81\,D\,\frac{\omega}{p}} = \frac{W_2}{W - W_1 - W_0} \quad . \; . \; . \; . \quad 45$$

sein.

Führen wir hier die früher gefundenen Werte für die Effekte ein, so erhalten wir:

$$s\,\frac{1}{y_1{}^2}\,(g_1 + g_0)\,L_0' - \frac{g_2}{y_2{}^2}\,L_2 = 0 \quad . \; . \; . \; . \quad 46$$

Fig. 27.



Betrachten wir nun die folgenden 4 Geraden:

$$\left.\begin{aligned}
\frac{1}{y_1{}^2}\,(g_1 + g_0)\,L_0' &= 0\\
\frac{1}{y_2{}^2}\,g_2\,L_2 &= 0\\
\frac{1}{y_1{}^2}\,(g_1 + g_0)\,L_0' - \frac{1}{y_2{}^2}\,g_2\,L_2 &= 0\\
\frac{s}{y_1{}^2}\,(g_1 + g_0)\,L_0' - \frac{1}{y_2{}^2}\,g_2\,L_2 &= 0
\end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \; . \quad 47$$

so sieht man, dass dieselben einen Strahlenbündel bilden, und zwar schneiden sie sich alle im synchronen Punkte C des Y-Kreises. Durch Vergleich mit den Gleichungen 36 sieht man, dass die dritte dieser Geraden identisch ist mit der Geraden $L_2' = 0$. Diese verbindet somit den synchronen Punkt C mit dem Kurzschlusspunkte K. Die vierte Gerade ist diejenige, welche durch den Punkt oder die Punkte des Y-Kreises geht, für welche die Schlüpfung gleich s ist.

In Fig. 27 sind die 4 Geraden dargestellt; dieselben werden durch eine Transversale in den 4 Punkten A, B, D und E geschnitten. Das Doppelverhältnis ist dann:

$$\frac{AE : AD}{BE : BD} = s.$$

Geht die Transversale in eine Parallele zu $L_0' = 0$ über, so geht das Doppelverhältnis über in das einfache Verhältnis:

$$s = \frac{AE'}{AD'}.$$

Teilen wir nun die Strecke AD′ in 100 gleiche Teile von A aus, so gibt uns der Teilstrich bei E′ direkt die für den betrachteten Punkt p des Kreises geltende Schlüpfung in Prozenten an.

c) Wirkungsgrad.

Der Gesamtwirkungsgrad abgesehen von Reibungsverlusten ist:

$$\eta = \frac{W'}{W} = \frac{W - W_1 - W_0 - W_2}{W} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 48.$$

Nach Gleichung 37 ist auch:

$$\eta = \frac{\frac{1}{b_2 y_1^2} \left[- b_2 (g_1 + g_0) + g_2 (b_1 + b_0)\right] L_2'}{r_1 L_b} \quad . \quad . \quad 49.$$

Wir haben hier wiederum einen durch die folgenden 4 Geraden gebildeten Strahlenbündel:

$$\left.\begin{array}{lr} r_1 L_b = 0 & \text{I.} \\ \frac{1}{b_2 y_1^2} \left[- b_2 (g_1 + g_0) + g_2 (b_1 + b_0)\right] L_2' = 0 & \text{II.} \\ r_1 L_b - \frac{1}{b_2 y_1^2} \left[- b_2 (g_1 + g_0) + g_2 (b_1 + b_0)\right] L_2' = 0 & \text{III.} \\ \eta r_1 L_b - \frac{1}{b_2 y_1^2} \left[- b_2 (g_1 + g_0) + g_2 (b_1 + b_0)\right] L_2' = 0 & \text{IV.} \end{array}\right\} 50.$$

Die erste von diesen Geraden ist einfach die Abscissenachse $g = 0$. Der Schnittpunkt des Strahlenbündels liegt somit auf der Abscissenachse. Die zweite der Geraden ist die Leistungslinie

$$L_2' = 0,$$

welche den synchronen Punkt C mit dem Kurzschlusspunkte K verbindet.

Der vierte Strahl geht durch den Punkt des Y-Kreises, für den der Wirkungsgrad η ist. Wir wollen den Verlauf der dritten Geraden

$$r_1 L_b - \frac{1}{b_2 y_1^2} [- b_2 (g_1 + g_0) + g_2 (b_1 + b_0)] L_2' = 0$$

untersuchen.

Nach Gleichung 36a können wir die Gerade auch schreiben:

$$r_1 L_b - r_1 L_b + r_1 L_1 + \frac{g_0}{y_1^2} L_0 + \frac{g_2}{y_2^2} L_2 = 0$$

oder

$$g_1 L_1 + g_0 L_0 + \frac{y_1^2}{y_2^2} g_2 L_2 = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 51.$$

Man sieht hieraus, dass diese Gerade durch den Schnittpunkt der beiden Geraden

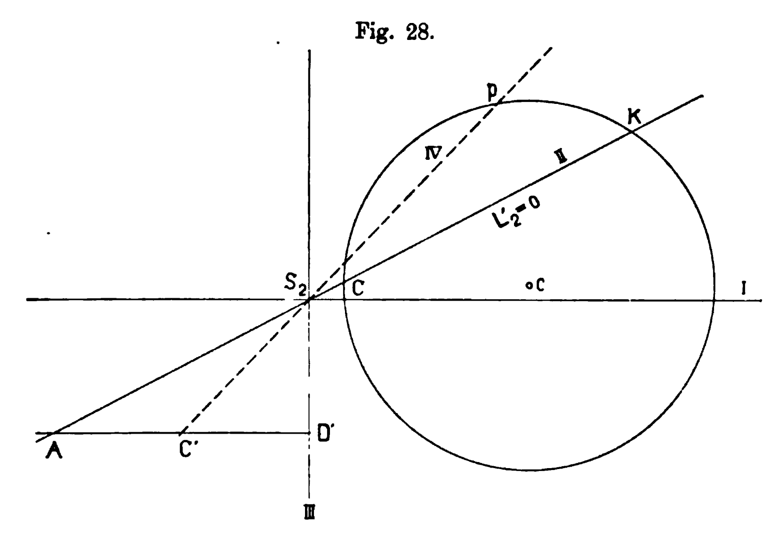
$$g_1 L_1 + g_0 L_0 = 0$$

und

$$L_2 = 0$$

geht. Diese beiden Linien sind schon bekannt. Die erstere, deren Gleichung in 43 abgeleitet ist, verbindet den Schnittpunkt der beiden

Fig. 28.



Geraden $L_1 = 0$ und $L_0 = 0$ mit dem Schnittpunkte des bei der Ableitung des Statorwirkungskreises ϑ gefundenen Strahlenbündels. Die letztere Gerade ist die Kreistangente im synchronen Punkte.

Der Wirkungsgrad wird nun genau so bestimmt wie früher ϑ. In Fig. 28 seien die 4 Strahlen dargestellt; der Strahl, für den η bestimmt werden soll, ist punktiert gezeichnet. Wir ziehen die Trans-

versale AD' parallel zur Abscissenachse. Das Doppelverhältnis der Strahlen ist dann

$$\eta = \frac{AC'}{AD'}.$$

Teilen wir die Strecke AD' von A ab in 100 gleiche Teile, so gibt uns der Teilstrich bei C' direkt den Wirkungsgrad des Motors in Prozenten für den betrachteten Punkt p.

Beispiel.

Um die Anwendung der gegebenen Beziehungen zu erläutern, soll für einen bestimmten Fall das Diagramm eines Motors mit Hilfe der Konstanten desselben entworfen werden.

Die Konstanten seien für eine Phase:

$$Y_0 = 0{,}1 + j\,0{,}4,$$
$$Y_1 = 3{,}33 + j\,10,$$
$$Y_2 = 2{,}614 + j\,11{,}1.$$

Hieraus erhält man nach den Gleichungen 6 die Mittelpunktskoordinaten des Y-Kreises:

$$\beta = 3{,}078 \text{ Mho},$$
$$\gamma = 0{,}1129 \text{ Mho}.$$

Ferner ist

$$C^2 = 2{,}245$$

und der Kreisradius

$$R = 2{,}70 \text{ Mho}.$$

Dieser Kreis ist in Fig. 29 gezeichnet.

Wir bestimmen nun nacheinander die folgenden Geraden und tragen dieselben in das Diagramm ein:

$$L_1 = 2\beta b + 2\gamma g - C^2 = 6{,}16\,b + 0{,}226\,g - 2{,}24,$$
$$L_0 = 2(\beta - b_1)b + 2(\gamma - g_1)g + y_1{}^2 - C^2 = 0$$
$$= -13{,}84\,b - 6{,}44\,g + 108{,}9.$$

Die Geraden $L_1 = 0$ und $L_0 = 0$ können eventuell nach den in Fig. 21 und 23 gegebenen Konstruktionen eingezeichnet werden.

Man bestimmt weiter

$$L_1' = L_1 - \frac{1}{r_1}\,g = 6{,}16\,b - 33{,}11\,g - 2{,}24.$$

Hierbei hat man als Kontrolle, dass die Gerade $L_1' = 0$ durch den Schnittpunkt s_1 der Geraden $L_1 = 0$ mit der Abscissenachse gehen muss.

Man bildet nun weiter

$$g_1 L_1' = 20{,}4\,b - 110\,g - 7{,}46,$$
$$g_0 L_0 = -1{,}39\,b - 0{,}644\,g + 10{,}9.$$

Hieraus findet man

$$(g_1 + g_0) L_0' = -g_1 L_1' - g_0 L_0 = -19{,}02\,b + 110{,}6\,g - 3{,}44.$$

Man trägt die Gerade $L_0' = 0$ in das Diagramm und beachtet, dass dieselbe durch den Schnittpunkt der beiden Geraden $L_0 = 0$ und $L_1' = 0$ gehen muss. Durch Einsetzung der gegebenen Konstanten in Gleichung 33 erhält man

$$x_2 y_1^2 L_2 = 55{,}1\,b + 0{,}32\,g - 21{,}1.$$

Man trägt die Gerade $L_2 = 0$ ein und beachtet, dass dieselbe den Y-Kreis tangieren muss in dem einen Schnittpunkte der Geraden $L_0' = 0$ mit demselben. Dies ist der synchrone Punkt C.

Bildet man nun

$$-g_2 x_2 y_1^2 L_2 = -144\,b - 4{,}32\,g + 55{,}3$$

und

$$b_2 (g_1 + g_0) L_0' = -211{,}8\,b + 1240\,g - 38{,}2,$$

so erhalten wir

$$[-(g_1 + g_0) b_2 + (b_1 + b_0) g_2] L_2' = b_2 (g_1 + g_0) L_0' - g_2 x_2 y_1^2 L_2$$
$$= -356\,b + 1236\,g + 17{,}1,$$

woraus man die Gerade $L_2' = 0$ konstruieren kann. Diese Gerade muss durch den synchronen Punkt C gehen, ferner schneidet sie den Kreis im Kurzschlusspunkte K.

Wir betrachten zuerst den Schnittpunkt der Geraden $L_0' = 0$ mit der Abscissenachse. Dieser Punkt, den wir mit S_1 bezeichnen wollen, bildet den Mittelpunkt des Strahlenbündels, der zur Ermittelung des Statorwirkungsgrades ϑ und somit zur Bestimmung des Drehmomentes dient. Zur Ermittelung von ϑ brauchen wir die Hilfsgerade, deren Gleichung in 43 gegeben ist, und welche durch den Schnittpunkt der beiden Geraden $L_1 = 0$ und $L_0 = 0$ geht. Weil dieser Schnittpunkt ausserhalb der Zeichnung fällt, muss man die Gerade anders bestimmen. Das kann z. B. geschehen, indem man den Winkel bestimmt, den die Gerade mit der positiven Richtung der Abscissenachse einschliesst. Bezeichnen wir diesen Winkel mit α, so findet man leicht aus der Gleichung der Geraden, welche lautet (siehe Gleichung 43):

$$g_1 L_1 + g_0 L_0 = 0,$$

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{\beta (g_1 + g_0) - g_0 b_1}{\gamma (g_1 + g_0) - g_0 g_1}.$$

In unserem Beispiel findet man

$$\operatorname{tg}\alpha = -177{,}5.$$

Einfacher findet man einen weiteren Punkt der durch S_1 gehenden Hilfsgeraden durch die folgende Konstruktion: In einer beliebigen Höhe über der Abscissenachse zieht man eine Parallele zu derselben. Diese Parallele schneide die beiden Geraden $L_1 = 0$ und $L_0 = 0$ bezw. in den Punkten s_1' und s_0'. Die Schnittpunkte der Geraden $L_1 = 0$ und $L_0 = 0$ mit der Abscissenachse seien mit s_1 und s_0 bezeichnet. Bestimmt man auf dieser Parallelen einen Punkt S_1' so, dass

$$\frac{S_1' s_1'}{S_1 s_1} = \frac{s_1' s_0'}{s_1 s_0},$$

so ist S_1' ein weiterer Punkt der gesuchten Geraden (siehe Fig. 29). Man findet nun die Skala für den Statorwirkungsgrad ϑ, wie oben erläutert.

Der Schnittpunkt S_2 der Geraden $L_2' = 0$ mit der Abscissenachse bildet den Mittelpunkt des zweiten Strahlenbündels, der zur Bestimmung des Gesamtwirkungsgrades η dient. Hierbei brauchen wir auch eine Hilfsgerade, welche, wie gezeigt, durch S_2 und den Schnittpunkt der Geraden $L_2 = 0$ mit der eben erhaltenen Hilfsgeraden S_1S_1' geht. Weil dieser Schnittpunkt auch ausserhalb der Zeichnung fällt, müssen wir aus der Gleichung der Geraden 51 den Winkel derselben mit der Abscissenachse bestimmen.

Eine einfachere Lösung erhalten wir hier auch durch die folgende Hilfskonstruktion:

Die Gerade $L_2 = 0$ schneide die Abscissenachse im Punkte s_2 und die zur Abscissenachse parallele Gerade $S_1' s_0'$ im Punkte s_2'. Bestimmen wir auf dieser Parallelen zur Abscissenachse einen Punkt S_2', so dass

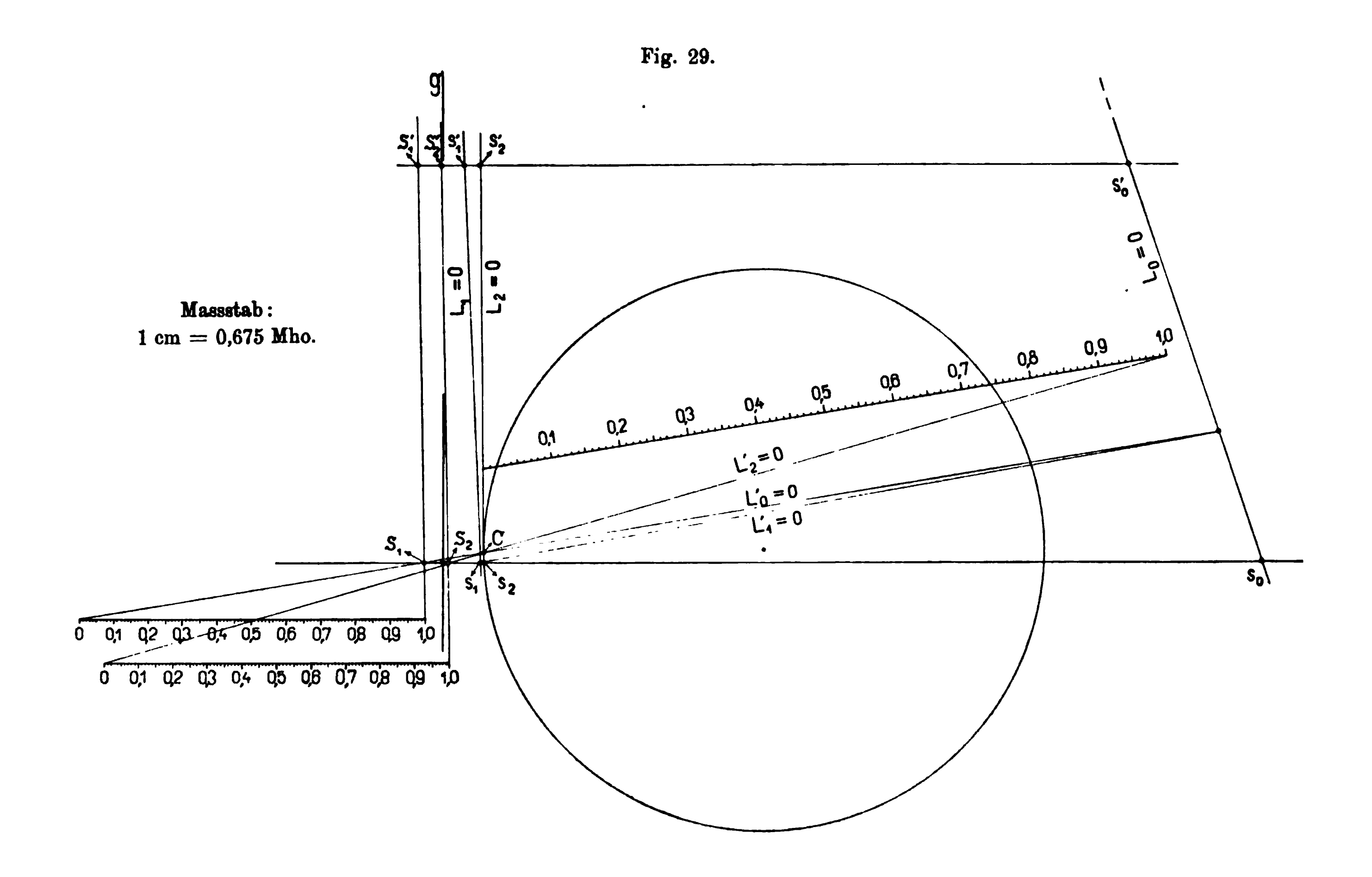
$$\frac{S_2' S_1'}{S_2 S_1} = \frac{s_2' S_1'}{s_2 S_1},$$

so geht unsere Hilfsgerade durch den Punkt S_2', und wir können sie sofort durch die Punkte S_2 und S_2' konstruieren.

Hiermit ist nun auch die Skala für den Wirkungsgrad η sofort gegeben, wie in Fig. 29 gezeigt.

Wir haben nur noch die Schlüpfung zu bestimmen. Dies bietet gar keine Schwierigkeiten; denn wir brauchen nur eine Parallele zu L_0' zu ziehen und den zwischen den Geraden $L_2' = 0$ und $L_2 = 0$ liegenden Teil dieser Parallelen in 100 Teile einzuteilen. Der Abschnitt eines Strahles durch den Leerlaufspunkt C auf dieser Parallelen

Fig. 29.



gibt dann die für den Schnittpunkt p mit dem Y-Kreise geltende Schlüpfung.

Hiermit ist das Diagramm vollständig.

Für irgend einen Punkt p des Kreises gibt die Ordinate desselben mit E_1^2 multipliziert die zugeführte Leistung. Der Abstand des Punktes p vom Ursprungspunkt O gibt mit E_1 multipliziert die Stromstärke. Der Winkel, den die Richtung O p mit der Ordinatenachse bildet, gibt die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung. Ein Strahl durch S_1 und p liefert den Statorwirkungsgrad ϑ, woraus sich das Drehmoment ergibt. Ein Strahl durch S_2 und p liefert den Gesamtwirkungsgrad η.

VII. Berücksichtigung der Reibung.

Ein Teil des auf den Rotor des Motors übertragenen Drehmomentes wird zur Ueberwindung von Luft-, Lager- und Bürstenreibung verbraucht. Das Drehmoment und die Leistung des Motors auf der Riemenscheibe gemessen sind deswegen etwas kleiner, als bis jetzt angenommen.

Weil das Gesetz, nach welchem die Reibungsverluste mit der Umdrehungszahl und mit der Leistung eines Motors variiert, nicht bekannt ist, müssen wir uns auf eine annähernde Berücksichtigung beschränken, indem wir ein willkürliches Gesetz annehmen.

Nehmen wir z. B. für die Ueberwindung der Reibung ein konstantes Drehmoment D_r an. Der vom Rotor abgegebene Reibungseffekt ist dann

$$W_r' = 9{,}81 \frac{\omega_2}{p} D_r \text{Watt}.$$

Hierbei ist ω_2 die Winkelgeschwindigkeit der Sekundärwickelung und p die halbe Polzahl des Motors.

$$\omega_2 = (1 - s)\,\omega,$$

$$W_r' = 9{,}81 \frac{\omega}{p} (1 - s) D_r.$$

Dividieren wir W_r' mit dem Wirkungsgrad des Rotors bei der Schlüpfung s, so erhalten wir den auf den Rotor zur Ueberwindung der Reibung übertragenen Effekt W_r. Der Wirkungsgrad des Rotors ist aber gleich $1 - s$. Somit ist der primär aufgewendete Reibungseffekt

$$W_r = 9{,}81 \frac{\omega}{p} D_r \text{Watt}.$$

Das äussere Drehmoment des Motors an der Riemenscheibe ist

$$D' = D - D_r = \frac{p}{9{,}81\,\omega}\,(W - W_1 - W_0 - W_r).$$

Setzen wir ähnlich wie früher

$$\vartheta' = \frac{W - W_1 - W_0 - W_r}{W},$$

so ist

$$D' = \frac{p}{9{,}81\,\omega}\,\vartheta' W.$$

Führen wir die Werte für die Effekte aus Gleichung 25 ein, so haben wir ähnlich wie in Gleichung 41:

$$\vartheta' = \frac{\frac{E_1^2}{y_1^2}(g_1 + g_0)L_0' - W_r}{\frac{E_1^2}{y_1^2}\,g_1 L_b} = \frac{(g_1 + g_0)L_0' - \frac{y_1^2}{E_1^2}W_r}{g_1 L_b}. \quad 41\,a.$$

Man hat nun für ϑ' einen Strahlenbündel, der demjenigen für ϑ vollständig analog ist. Die Geraden des Strahlenbündels sind:

$$\left.\begin{array}{lr} g_1 L_b = 0 & \text{I} \\ (g_1 + g_0)L_0' - \frac{y_1^2}{E_1^2}W_r = 0 & \text{II}' \\ g_1 L_b - (g_1 + g_0)L_0' + \frac{y_1^2}{E_1^2}W_r = 0 & \text{III}' \\ \vartheta' g_1 L_b - (g_1 + g_0)L_0' + \frac{y_1^2}{E_1^2}W_r = 0 & \text{IV}' \end{array}\right\} \quad . \; . \quad 42\,a.$$

Die erste Gerade ist die Abscissenachse. Der Schnittpunkt des Strahlenbündels liegt also auf derselben. Die Gerade II' verläuft, weil $\frac{y_1^2}{E_1^2}W_r$ eine Konstante ist, parallel zur Geraden $L_0' = 0$ oder zur Geraden II im Strahlenbündel 42. Die Gerade III' ist aus demselben Grunde parallel zur Geraden III im Strahlenbündel 42. Der Strahlenbündel für ϑ' wird erhalten, wie in Fig. 30 dargestellt, einfach durch Parallelverschiebung des Strahlenbündels für ϑ.

Die Gerade II' schneidet den Kreis in dem Leerlaufspunkte des Motors E. Ist somit dieser Punkt durch Versuch bekannt, und ist das sonstige Diagramm entwickelt, so kann man die neue Drehmomentlinie II' erhalten einfach durch Ziehen der Parallelen zu $L_0' = 0$ durch diesen Leerlaufspunkt E.

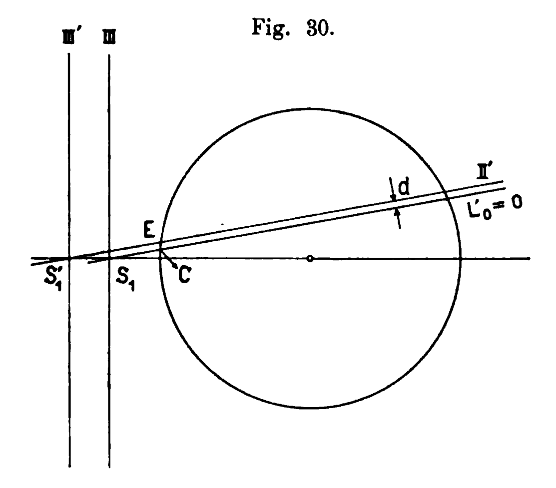
Aus dem Abstande, den die Gerade II' so von der Geraden $L_0' = 0$ erhält, berechnet man den Reibungseffekt nach dem folgenden Verfahren:

Für einen Punkt der Geraden II' gilt

$$(g_1 + g_0)L_0' - \frac{y_1^2}{E_1^2} W_r = 0,$$

$$W_r = \frac{E_1^2}{y_1^2}(g_1 + g_0)L_0'.$$

Fig. 30.



Nach Gleichung 26 ist aber

$$L_0' = 2\sqrt{\left(\frac{g_0 b_1}{g_1 + g_0} - \beta\right)^2 + \left(\frac{g_0 g_1 + \frac{1}{2} y_1^2}{g_1 + g_0} - \gamma\right)^2}\, d,$$

wo d die Entfernung der Geraden II' von der Geraden $L_0' = 0$ bedeutet.

$$W_r = 2\frac{E_1^2}{y_1^2}\sqrt{[b_1 g_0 - \beta(g_1 + g_0)]^2 + \left[g_0 g_1 + \frac{1}{2}y_1^2 - \gamma(g_1 + g_0)\right]^2}\, d \qquad 52.$$

Ist umgekehrt das Diagramm für einen Motor zu entwerfen, für welchen die Konstanten und ebenso der Reibungseffekt W_r ermittelt ist, so erhält man aus der obigen Gleichung d und zieht die Gerade II' parallel zu $L_0' = 0$.

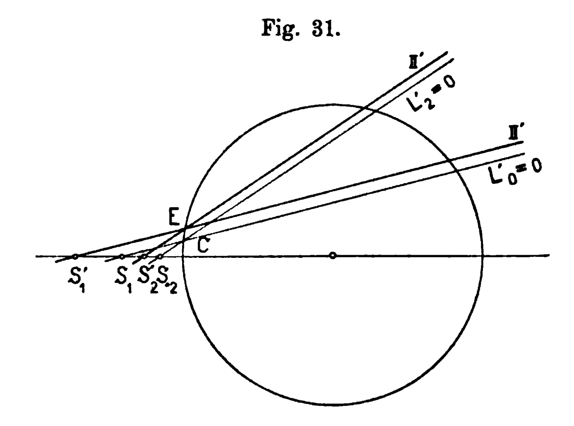
Der Wirkungsgrad lässt sich am einfachsten mit Berücksichtigung der Reibungsverluste im Diagramm darstellen unter Annahme eines konstanten Effektverlustes durch Reibung.

Bezeichnen wir diesen konstanten Effektverlust mit W_r, so haben wir den Wirkungsgrad

$$\eta' = \frac{W - W_1 - W_0 - W_2 - W_r}{W}.$$

Führt man hier die Werte der Effekte nach Gleichung 37 ein, so erhält man einen Strahlenbündel S_2', der demjenigen für den Wirkungsgrad η ohne Reibung vollständig analog ist, aber gegen denselben auf der Abscissenachse parallel verschoben erscheint (Fig. 31). Der Beweis für die Parallelverschiebung des Strahlenbündels S_2 für den Wirkungsgrad ist genau derselbe wie derjenige für

Fig. 31.



die Parallelverschiebung des Strahlenbündels S_1 für das Drehmoment oder für $\dot{\vartheta}$.

Die neue Leistungslinie verläuft parallel zur Geraden $L_2' = 0$ und schneidet die neue Drehmomentlinie auf dem Kreise, also im Leerlaufspunkte E des Motors.

VIII. Graphische Konstruktion des Diagrammes der Mehrphasenmotoren.

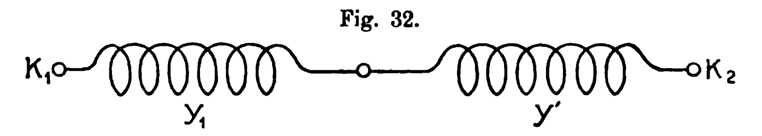
Obwohl das gegebene analytische Verfahren zur Ermittelung des Diagrammes keine schwierige Rechnung notwendig macht, sobald die drei in Frage kommenden Admittanzen bekannt und, wie im ersten Teil ausführlich behandelt, auf die primäre Wickelung bezogen sind, so soll doch im folgenden eine graphische Lösung gegeben werden, welche das Diagramm ohne irgend welche Rechnung aus den bekannten Admittanzen zu ermitteln gestattet.

Fig. 32 stelle zwei Admittanzen y_1 und y' in Hintereinanderschaltung vor. Die Admittanz zwischen den Klemmen K_1 K_2 ist dann bekanntlich in komplexer Schreibweise:

$$Y = \frac{Y_1 Y'}{Y_1 + Y'}.$$

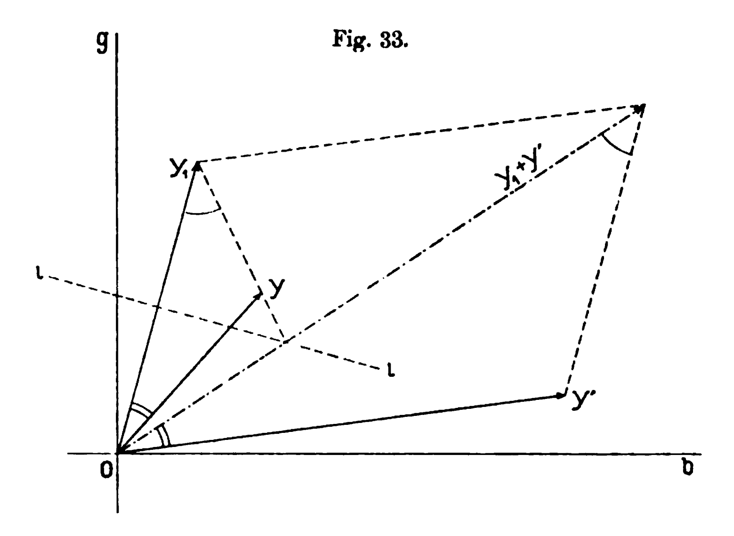
Diese Gleichung können wir leicht graphisch konstruieren. Stellen in Fig. 33 die Vektoren $O y_1$ und $O y'$ die Admittanzen y_1 und y' nach

Fig. 32.



Grösse und Richtung dar und konstruieren wir über die Strecke $O y_1$ ein Dreieck $O y y_1$, welches dem Dreiecke $O y' (y_1 + y')$ über $y_1 + y'$ ähnlich ist, so stellt $O y$ die resultierende Admittanz der Hintereinanderschaltung dar. Trägt man eine Gerade 1 1 senkrecht auf $O y_1$ und

Fig. 33.

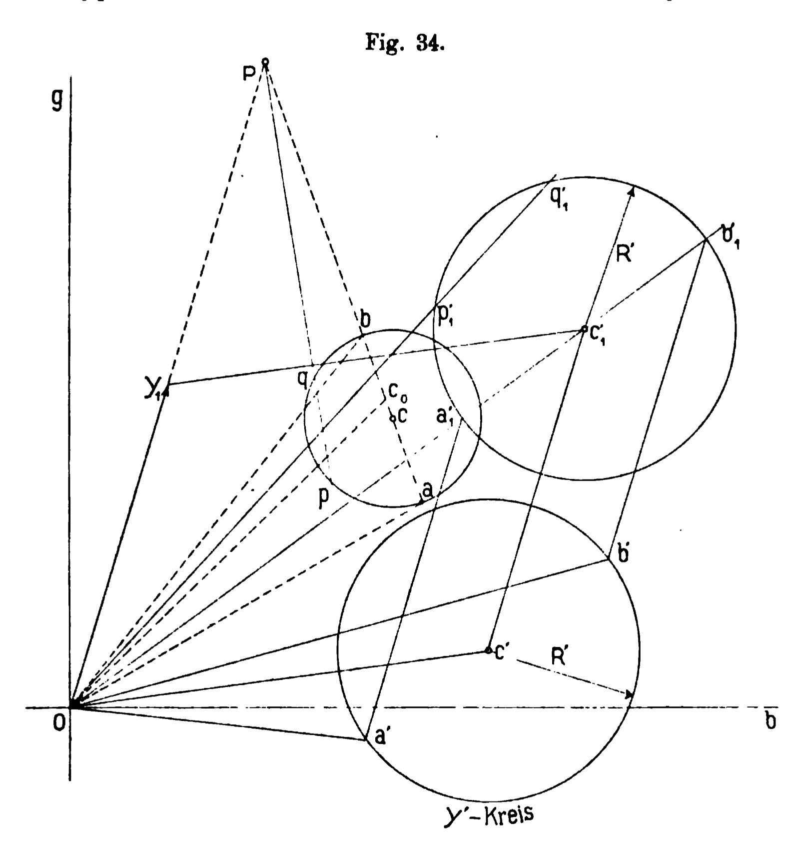


durch den Mittelpunkt dieses Vektors, so sieht man aus der Gleichheit der entsprechenden Winkel, dass der Punkt y auf der Verbindungslinie von y_1 zum Schnittpunkte von der Geraden 1 1 mit dem Strahl $O (y_1 + y')$ liegen muss. Der Punkt y ist in unserer früheren Ausdrucksweise die Abbildung des Punktes y'.

Durchläuft der Punkt y' irgend eine Kurve, während y_1 fest bleibt, so durchlaufen die Punkte $(y_1 + y')$ und y entsprechende Kurven.

Die Kurve des Punktes $(y_1 + y')$ gibt die Admittanz für Parallelschaltung, und die Kurve des Punktes y gibt die Admittanz für Hintereinanderschaltung. Beschreibt z. B. der Punkt y' einen Kreis um den Punkt c' mit dem Radius R' (siehe Fig. 34), so beschreibt der Punkt $(y_1 + y')$ ebenfalls einen Kreis mit dem Radius R', dessen Zentrum c_1' wir leicht finden, indem wir den Mittelpunkt c' um die Strecke y_1 verschieben. Wir wollen nun die Kurve für y bestimmen;

Fig. 34.



hierbei ist es zweckmässig, den Massstab etwas grösser zu nehmen, weil sonst die Abbildung zu klein ausfällt. Wir können dies thun, weil es bei der Konstruktion nur auf die Winkel ankommt. Wir nehmen den Massstab zweimal so gross und haben folglich den Vektor y_1 auf das Zweifache zu vergrössern; der so erhaltene Punkt sei mit P bezeichnet; $OP = y_1$ im neuen Massstab. Wir ziehen den Strahl von O durch c_1' und bekommen die Schnittpunkte a_1' und b_1' mit den entsprechenden Punkten a' und b' auf dem Y'-Kreise. Die Abbildungen

dieser Punkte liegen auf einem und demselben Strahle durch P, der so gezogen ist, dass der Winkel zwischen diesem Strahle und y_1 gleich $\angle O a_1' a'$ oder gleich $\angle O b_1' b'$ ist. Tragen wir nun die folgenden Winkel ein:

$$\angle P O a = \angle c_1' O a',$$
$$\angle P O c_0 = \angle c_1' O c',$$
$$\angle P O b = \angle c_1' O b',$$

so stellen die Punkte a, c_0 und b der Reihe nach die Abbildungen der Punkte a′, c′ und b′ dar. Aus der Aehnlichkeit der entsprechenden Dreiecke hat man nun, weil $2 y_1 = O P$ ist:

$$P a : 2 y_1 = y_1 : O a_1',$$
$$P b : 2 y_1 = y_1 : O b_1',$$
$$P a \, . \, P b = \frac{4 y_1^4}{O a_1' \, . \, O b_1'}.$$

Für irgend einen anderen Strahl durch O, der den Kreis um c_1' in p_1' und q_1' schneiden möge, erhalten wir für die Abbildungen p und q die Proportionen:

$$P p : 2 y_1 = y_1 : O p_1'$$
$$P q : 2 y_1 = y_1 : O q_1'$$
$$P p \, . \, P q = \frac{4 y_1^4}{O p_1' \, . \, O q_1'}.$$

Nun ist $O p_1' \, . \, O q_1' = O a_1' \, . \, O b_1' = \text{konst.}$ Folglich ist auch

$$P p \, . \, P q = P a \, . \, P b = \text{konst.}$$

Die Abbildungen a, b, p und q liegen also auf einem Kreise, dessen Zentrum im Mittelpunkte zwischen a und b liegt. Dieser Kreis ist der von uns früher behandelte Y-Kreis. Bezeichnen wir mit y_c die Admittanz O c′ bis zum Zentrum des Y′-Kreises und mit y_{c1} die geometrische Summe von y_1 und y_c gleich $O c_1'$, so können wir den Radius R des Y-Kreises bestimmen:

$$R = \frac{1}{2} (P a - P b) = \frac{1}{2} \left[\frac{2 y_1^2}{y_{c1} - R'} - \frac{2 y_1^2}{y_{c1} + R'} \right]$$

$$= \frac{y_1^2}{y_{c1}^2 - R'^2} \, 2 R' \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 53.$$

Dies ist abgesehen von der Verdoppelung des Massstabes derselbe Wert wie früher in 7 b gefunden.

Der Abstand des Kreismittelpunktes c vom Punkte P findet sich, wie folgt:

$$Pc = \frac{1}{2}(Pa + Pb) = \frac{1}{2}\left[\frac{2y_1^2}{y_{c1} - R'} + \frac{2y_1^2}{y_{c1} + R'}\right]$$

$$= \frac{2y_1^2 y_{c1}}{y_{c1}^2 - R'^2} = \frac{R}{R'} y_{c1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 54.$$

Die veränderliche Admittanz y' können wir uns auch aus zwei parallel geschalteten Admittanzen y_0 und y_2 zusammengesetzt denken, wovon y_0 konstant ist, während y_2 nach dem Y'-Kreis variiert. Wir bekommen dann die in Fig. 14 dargestellte Ersatzschaltung für einen Mehrphasenmotor, und die eben erörterte Konstruktion lässt sich zur Bestimmung des Diagrammes eines solchen Motors verwenden.

Beispiel.

Die Konstruktion soll an Hand von Fig. 35 erläutert werden.

Der Kreis um c_1' stelle mit y_1 als Anfangspunkt den ersten Admittanzkreis oder den Y'-Kreis des Motors dar. Die Zentrumskoordinaten desselben sind dann in Bezug auf den Punkt y_1 als Anfangspunkt $\left(b_0 + \frac{1}{2x_2}\right)$, (g_0) und der Kreisradius R' ist gleich $\frac{1}{2x_2}$. Ferner stelle Oy_1 die primäre Admittanz des Motors dar. Wir wollen den Y-Kreis in dem zweifachen Massstab zeichnen und verlängern zu dem Zweck Oy_1 auf das Doppelte bis zum Punkte P. Jetzt ziehen wir als eine Hilfslinie eine Senkrechte 11 auf OP, welche die Strecke OP halbiert und also durch den Punkt y_1 geht. Ziehen wir Strahlen einmal von O zu einem Punkte auf dem Y'-Kreis und das andere Mal von P zu dem entsprechenden Punkte des Y-Kreises, so schneiden sich diese Strahlen auf dieser auf OP senkrechten Hilfslinie 11.

Zuerst ziehen wir den Strahl Oc_1' und durch den Schnittpunkt desselben mit 11 den Strahl mit Pc. Wir bestimmen am einfachsten die Lage des Zentrums c auf diesem Strahl nach der in 54 gegebenen Formel für Pc. Ebenso hat man nach der Formel 53 den Kreisradius R. Wir bestimmen nun die Abbildungen der Punkte A′, B′, C′, D′ und K′; die Abbildungen sind A, B, C, D und K. Um den Punkt A zu bestimmen, hat man z. B. nur einen Strahl von O nach A′ zu ziehen und durch den Schnittpunkt dieses Strahls mit 11 einen Strahl durch P. Dieser letztere Strahl schneidet den Y-Kreis in dem gesuchten Punkte A. Ebenso werden die weiteren Punkte bestimmt. Durch die so erhaltenen Punkte können nun die Verlustlinien $L_1' = 0$, $L_0' = 0$, $L_2 = 0$ und $L_2' = 0$ gezogen werden. Die Verlustlinie $L_1 = 0$ konstruiert man entweder aus der Bedingung, dass sie durch den

Schnittpunkt von der Abscissenachse und der Geraden $L_1 = 0$ und senkrecht auf Oc gehen muss; oder man konstruiert sie nach der in Fig. 21 gezeigten Methode. Die Gerade $L_0 = 0$ wird auch erhalten entweder aus der Bedingung, dass sie durch den Schnittpunkt der Geraden $L_1' = 0$ und $L_0' = 0$ und senkrecht auf Pc gehen muss, oder besser durch die in Fig. 23 gegebene Konstruktion.

Wir haben nun die Schnittpunkte mit der Abscissenachse S_1, S_2, s_1 und s_0. In einer beliebigen Höhe ziehen wir eine Hilfsgerade $s_1' s_0'$ und bestimmen auf derselben zwei Punkte S_1' und S_2', so dass

$$\frac{S_1' s_1'}{S_1 s_1} = \frac{s_1' s_0'}{s_1 s_0}$$

und

$$\frac{S_2' S_1'}{S_2 S_1} = \frac{s_2' S_1'}{s_2 S_1}.$$

Hiermit sind die Geraden $S_1' S_1$ und $S_2' S_2$ festgelegt und das Diagramm vollständig bestimmt.

Das in Fig. 35 gezeichnete Diagramm gilt für den 5 PS.-Drehstrommotor, dessen Konstanten wir schon experimentell bestimmt und dessen Stromdiagramm wir in Fig. 18 analytisch ausgerechnet haben.

Die Konstanten dieses Motors waren:

$$Y_1 = 0{,}371 + j\,1{,}11,$$
$$Y_2 = 0{,}382 + j\,1{,}11,$$
$$Y_0 = 0{,}0043 + j\,0{,}0458.$$

Der Massstab des Y-Kreises in Fig. 35 ist 1 cm = 0,0885 Mho.

Wir wollen dies Diagramm dadurch vervollständigen, dass wir den Effektverlust durch Reibung berücksichtigen.

Bei Leerlauf des Motors und 110 Volt pro Phase wurde eine Stromstärke von 4,8 Amp. und ein Effekt von 204 Watt pro Phase gemessen. Hieraus bestimmt sich derjenige Punkt des Y-Kreises des Motors, auf dem derselbe bei Leerlauf arbeitet (Leerlaufspunkt E). Die Admittanz dieses Punktes E ist:

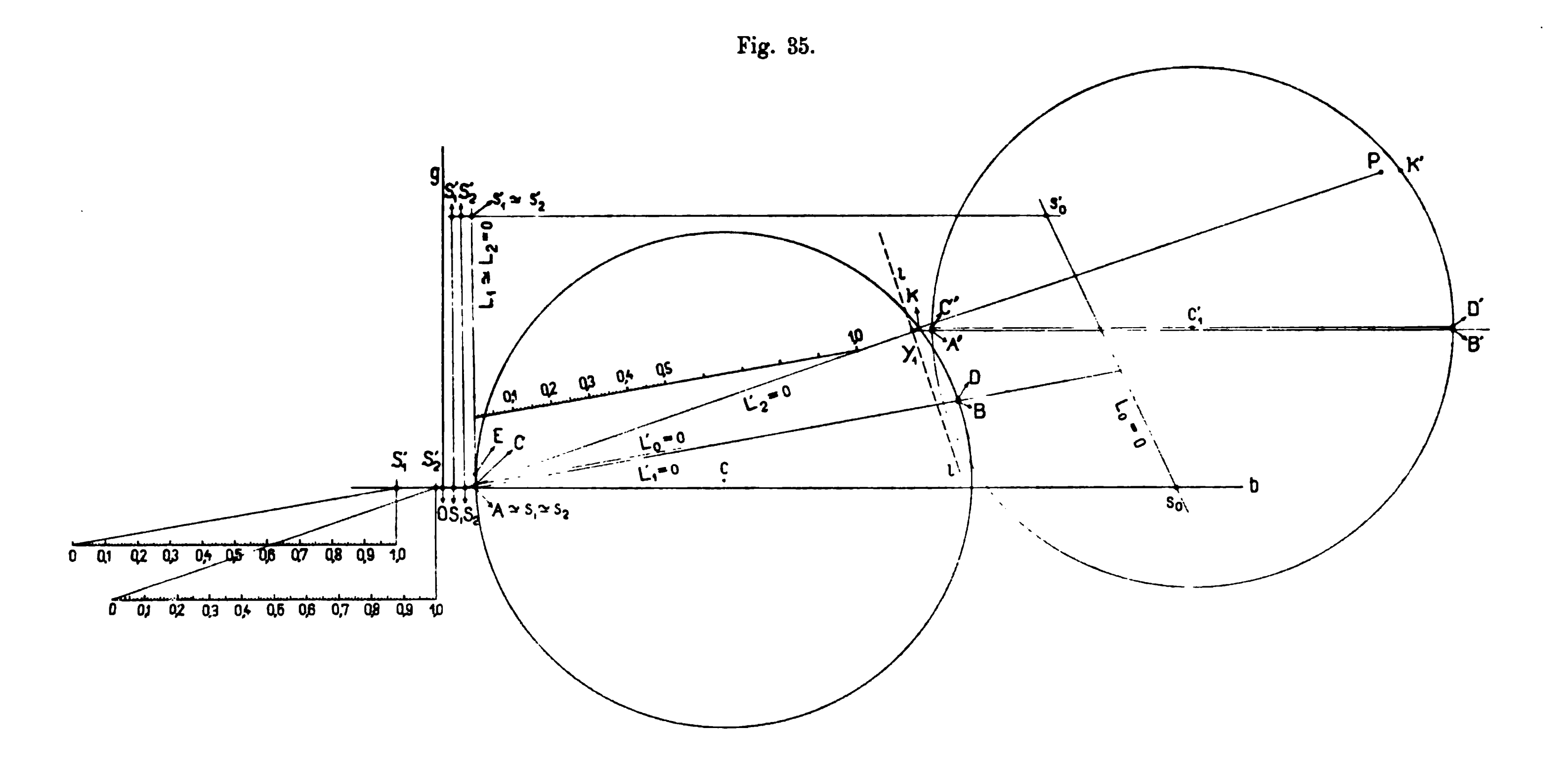
$$\frac{4{,}8}{110} = 0{,}0436 \text{ Mho}.$$

Die Konduktanz ist:

$$\frac{204}{110^2} = 0{,}0168 \text{ Mho}.$$

Ziehen wir durch diesen Punkt E des Y-Kreises einmal eine Parallele zu der Geraden $L_0' = 0$ und das andere Mal eine Parallele zu $L_2' = 0$,

Fig. 35.



g
S_1' S_2'
$S_1 \simeq S_2'$
$L_1 \simeq L_2 = 0$
s_0'
P
K'
C'
C_1'
D'
B'
K
l
Y_1
A'
D
B
$L_0 = 0$
$L_2' = 0$
$L_0' = 0$
$L_1' = 0$
c
E
C
S_1' S_2'
$O S_1 S_2$
$A \simeq S_1 \simeq S_2$
s_0
b

so erhalten wir die beiden Schnittpunkte S_1' und S_2' mit der Abscissenachse, welche bezw. zur Bestimmung des Statorwirkungsgrades ϑ und des Gesamtwirkungsgrades η mit Berücksichtigung der Reibung dienen. Zu dem Zweck legt man durch den Punkt S_1' der Abscissenachse eine Gerade parallel zu $S_1 S_1'$ und durch den Punkt S_2' der Abscissenachse eine Gerade parallel zu $S_2 S_2'$. Die Einteilungen zur Ablesung von Schlüpfung s sowie Wirkungsgrad η und ϑ sind nun genau wie früher vorzunehmen.

Ein Beitrag zur Vorausberechnung der Kommutationsverhältnisse bei Gleichstrommaschinen und des Spannungsabfalls bei Wechselstromgeneratoren.

Von

Dr.-Ing. **H. Gallusser,**

Karlsruhe, Elektrotechnisches Institut der Grossherzogl. Technischen Hochschule.

Mit 32 Abbildungen.

Einleitung.

Bekanntlich sind die Belastungsgrenzen einer Dynamomaschine durch die Funkenbildung und durch die zulässige Erwärmung gegeben. Bei einer gut berechneten Maschine, d. h. bei bester Ausnutzung des Materials kann man aber heute verlangen, dass die Belastungsgrenze nur noch durch die Erwärmung bedingt wird, und die Funkenbildung nicht mehr in Frage kommen darf. Da für letztere die Kommutationsverhältnisse ausschlaggebend sind, so ist es von grösster Wichtigkeit, die Selbstinduktion einer kurzgeschlossenen Spule und die gegenseitige Induktion derselben mit den anderen kurzgeschlossenen Spulen zu kennen.

Wie Arnold in seinem unten zitierten Werke nachweist, ist der zeitliche Verlauf des Kurzschlussstromes für die Funkenbildung und die Erwärmung des Kollektors massgebend und ein geradliniger Verlauf dieser Kurve, d. h. konstante Stromdichte unter den Bürsten am günstigsten. Um letzteres zu erhalten, muss aber das kommutierende Feld oder die von diesem in der Spule induzierte E.M.K. den Wert haben

$$e_k = 2\,i_a \left[\frac{L + \Sigma(M)}{T} + R\left(\frac{t}{T} - \frac{1}{2}\right)\right]^{1)}.$$

Daselbst bedeutet:

i_a = Strom pro Ankerstromzweig,

L = Selbstinduktionskoeffizient einer kurzgeschlossenen Spule,

[1] Siehe Die Gleichstrommaschine von Professor E. Arnold. Verlag von J. Springer. Berlin 1902. I. Teil: Theorie der Gleichstrommaschine S. 283, 286 und 485.

M = gegenseitiger Induktionskoeffizient dieser Spule und einer benachbarten kurzgeschlossenen Spule,
T = Kurzschlusszeit,
R = Widerstand der kurzgeschlossenen Spule.

Weicht die vom Felde induzierte E.M.K. von e_k ab, so entsteht in der kurzgeschlossenen Spule ein zusätzlicher Strom, der eine ungleichmässige Stromverteilung unter den Bürsten verursacht und dadurch zu einer grossen Spannungsdifferenz zwischen den Bürstenspitzen und der ab- resp. auflaufenden Lamelle Veranlassung gibt.

Bei modernen Maschinen verlangt man, dass die Bürsten von Leerlauf bis Volllast nicht verschoben zu werden brauchen. Es kann somit die kommutierende E.M.K. nur für eine mittlere Belastung den richtigen Wert haben. Die Bürsten müssen sich deshalb so einstellen lassen, dass weder bei Leerlauf noch bei Volllast die Spannung zwischen den Bürstenspitzen und der ab- resp. auflaufenden Lamelle einen so grossen Wert annehmen kann, dass Funken entstehen. Werden nun die Bürsten so eingestellt, dass die Spannung zwischen der Bürstenspitze und der ablaufenden Lamelle bei Leerlauf und Volllast die gleiche ist, so lässt sich diese aus der folgenden Formel berechnen:

$$P_T'' = \frac{e_m + e_q}{1 - \frac{e_s}{P_w}} \text{ für } P_w > e_s,$$

wenn

P_w = eine von der Kohlensorte abhängige constante Spannung,
e_q = die vom Ankerfeld in der kurzgeschlossenen Spule induzierte E.M.K.,
$e_m = \frac{L + \Sigma M}{T} i_a$,
$e_s = k_u \cdot \frac{L_s}{T} \cdot 2\, i_a$ die effektive E.M.K. der scheinbaren Selbstinduktion in der Kurzschlusszeit,
k_u = der Formfaktor dieser E.M.K.,
L_s = der scheinbare Selbstinduktionskoeffizient

bedeutet.

P_T'' darf eine gewisse Grenze, die von der Kohlensorte abhängig ist, nicht überschreiten. Für die Spannung P_T' zwischen der Bürstenspitze und den auflaufenden Kollektorlamellen erhalten wir einen Wert, der kleiner ist als P_T''.

Wenn also für die ablaufende Kollektorlamelle die Bedingung

für funkenfreien Gang erfüllt ist, so treten auch zwischen der auflaufenden Lamelle und der Bürstenspitze keine Funken auf.

Ist aber

$$P_w \leqq e ,$$

so wird P_T'' unendlich gross und die Maschine wird funken.

Es ist daher für die Vorausberechnung von Gleichstrommaschinen von grosser Bedeutung, die Induktionskoeffizienten

$$L, M \text{ und } L_s$$

mit einiger Genauigkeit berechnen zu können.

Aber nicht nur bei der Vorausberechnung von Gleichstrommaschinen ist die Kenntnis der Induktionskoeffizienten von Wichtigkeit, sondern wie E. Arnold und J. L. la Cour in ihrem vor einiger Zeit erschienenen „Beitrag zur Vorausberechnung und Untersuchung von Ein- und Mehrphasengeneratoren" gezeigt haben, ist gerade auch bei der Vorausberechnung der Wechselstromgeneratoren und speziell für die einwandsfreie Vorausbestimmung des Spannungsabfalles derselben die Ermittelung des Selbstinduktionskoeffizienten der Armaturspulen durchaus erforderlich.

A. Berechnung der Induktionskoeffizienten.

I. Berechnung des Selbstinduktionskoeffizienten L.

Während der Kommutation befinden sich die induzierten Seiten der kurzgeschlossenen Spule zwischen den Polen. Die experimentelle Untersuchung hat ergeben, dass der Selbstinduktionskoeffizient einer Ankerspule in dieser Lage und für den Fall, dass der Anker sich ausserhalb des Feldes, also in Luft befindet, praktisch gleich ist (siehe S. 406). Dieses wichtige Resultat ermöglicht es uns, den Selbstinduktionskoeffizienten L einer Ankerspule während der Kommutation mit grosser Annäherung zu berechnen.

Denken wir uns den Anker aus dem Feld herausgenommen und um die zu untersuchende Spule ein Kraftlinienbild entworfen, das dem wirklichen möglichst nahe kommen soll, so lassen sich nun bei diesem Kraftlinienbilde folgende Teile unterscheiden:

α) der induzierte Teil,
β) die Stirnverbindungen und beim Ringanker noch
γ) die innere Verbindung.

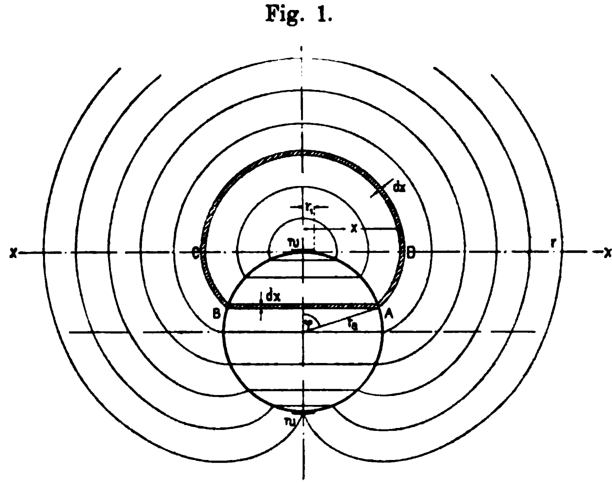
Für alle diese Teile sind aber die einzelnen Kraftlinienbilder ganz verschieden, so dass jeder Teil für sich gerechnet werden muss.

1. Glatte Armaturen.

a) Trommelanker.

In Fig. 1 ist eine glatte Trommelarmatur mit einer Durchmesserspule von der Windungszahl w dargestellt. Für eine induzierte Seite ist das Kraftlinienbild aufgezeichnet, über welches sich noch ein gleiches, aber umgekehrtes, herrührend von der anderen Spulenseite,

Fig. 1.



superponieren würde. Für den Entwurf eines solchen Kraftlinienbildes, das dem wirklichen sehr nahe kommen soll, sind zwei Bedingungen möglichst zu erfüllen:

α) Da die magnetische Leitfähigkeit des Eisens gegenüber der Luft ausserordentlich gross ist, so müssen die Kraftröhren senkrecht oder nahezu senkrecht auf den Anker auftreffen.

β) Die Leitfähigkeit des Feldes muss möglichst gross sein, weil das Feld einer Strombahn sich stets so einstellt, dass die Energie desselben ein Maximum ist.

Man wird daher am besten thun, andere Kraftlinienbilder zu entwerfen und von diesen dasjenige wählen, das die grösste Leitfähigkeit besitzt.

Das in Fig. 1 gezeichnete Kraftlinienbild ist so entworfen worden, dass es diesen beiden Bedingungen möglichst genügt. Der Kraft-

linienweg in der Luft setzt sich aus zwei verschiedenen Kurven zusammen. Der Teil, der über der x-Achse liegt, ist ein Halbkreis, die beiden anderen Teile (A D und B C) sind Evolventen mit dem Umriss des Ankers als Grundkreis. Um nun den Selbstinduktionskoeffizienten dieser Spule berechnen zu können, bedienen wir uns eines wichtigen Satzes der theoretischen Elektrizitätslehre, dass die Intensität des magnetischen Kraftflusses Φ gleich ist der magnetomotorischen Kraft $\mathfrak{M}$ multipliziert mit der magnetischen Leitfähigkeit F.

Betrachten wir zunächst einen schmalen Streifen. Da der Widerstand des Kraftflusses im Eisen gegenüber dem in der Luft ausserordentlich klein ist, so dürfen wir, ohne einen merkbaren Fehler zu begehen, diesen Widerstand vernachlässigen[1]). Somit ist die magnetische Leitfähigkeit dieses kleinen Streifens

$$d F = \frac{d x \, . \, l}{\pi x + 2 \, \frac{r_a \, . \, \varphi^2}{2}},$$

wo l die Länge des Ankers ist und die Bedeutungen der anderen Buchstaben aus Fig. 1 ersichtlich sind. Daselbst ist

$$r_a \, . \, \varphi = x \qquad \text{oder} \qquad \varphi = \frac{x}{r},$$

folglich wird

$$d F = \frac{d x \, . \, l}{\pi x + \frac{x^2}{r_a}} = \frac{r_a \, . \, l \, . \, d x}{x^2 + \pi \, . \, r_a \, . \, x}.$$

Im Intervall $0 - r_1$ ist x gegenüber r_a so klein, dass $\frac{x^2}{r_a}$ vernachlässigt werden darf. Es ist somit für dieses Intervall $0 - r_1$

$$d F = \frac{l \, . \, d x}{\pi \, . \, x}$$

die magnetomotorische Kraft $\mathfrak{M}_1$ im Intervall $0 - r_1$ ist

$$\mathfrak{M}_1 = \frac{4 \pi}{10} \, . \, w \, . \, \frac{x}{r_1}$$

und mithin der Kraftfluss $d \Phi_1$

$$d \Phi_1 = \frac{4 \pi}{10} \, w \, . \, \frac{x}{r_1} \, . \, \frac{l \, . \, d x}{\pi \, . \, x}.$$

[1]) Diese Annahme gilt nicht bloss hier, sondern auch bei allen späteren Berechnungen.

Der Kraftfluss $d\Phi_1$ ist mit $\frac{x \cdot w}{r_1}$ Windungen verkettet, der Selbstinduktionskoeffizient L_1 wird also für das Intervall $0 - r_1$

$$L_1 = \int_0^{r_1} 0{,}4 \cdot \frac{w}{r_1} \cdot l \cdot w \frac{x}{r_1} dx,$$

$$L_1 = 0{,}2\, w^2 l = w^2 l \cdot \lambda_w, \quad \ldots \ldots \quad (1)$$

wo $\lambda_w = 0{,}2$ bedeutet.

Im Intervall von $r_1 - r$ ist die magnetomotorische Kraft $\mathfrak{M}_2$ konstant

$$\mathfrak{M}_2 = \frac{4\pi}{10} w$$

und der Kraftfluss derselben umschlingt alle Windungen der Spule. Der Selbstinduktionskoeffizient L_2 dieses Raumes wird dann

$$L_2 = \int_{r_1}^{r} \frac{4\pi}{10} \cdot w \cdot w \cdot \frac{r_a \cdot l \cdot dx}{x^2 + \pi r_a x}.$$

Es ist aber $r = r_a \cdot \pi$,

$$L_2 = \frac{4\pi}{10} w^2 \cdot r_a \cdot l \int_{r_1}^{\pi r_a} \frac{dx}{x^2 + \pi r_a x} = 0{,}4 \cdot \pi \cdot w^2 \cdot l \frac{1}{\pi r_a} \left[\lg \mathrm{nat} \left(\frac{x}{x + \pi r_a} \right) \right]_{r_1}^{\pi r_a},$$

$$L_2 = 0{,}4 \cdot w^2 \cdot l \cdot \lg \mathrm{nat} \left(\frac{r_1 + \pi r_a}{2 r_1} \right).$$

Und indem wir noch die Briggschen Logarithmen einführen $\lg \mathrm{nat}\, x = 2{,}3 \cdot \lg^{10} x$) und L_2 in Henry ausdrücken, erhalten wir

$$L_2 = \frac{w^2 \cdot l}{10^8} \cdot 0{,}92 \cdot \lg \left(\frac{r_1 + \pi r_a}{2 r_1} \right). \quad \ldots \quad (2)$$

Der Selbstinduktionskoeffizient L des induzierten Teiles der Spule ist gleich der Summe von L_1 und L_2 multipliziert mit der Anzahl der Spulenseiten u, in unserem Falle mit 2

$$L = 2(L_1 + L_2) = \frac{w^2 \cdot 2 \cdot l}{10^8} \left[0{,}2 + 0{,}92 \cdot \lg \left(\frac{r_1 + \pi r_a}{2 r_1} \right) \right]. \quad (3)$$

Bei allen bisher in der Litteratur bekannten Berechnungen von L_2 wird nur der Kraftlinienweg oberhalb der x-Achse berücksichtigt, d. h. der Anker wird in eine Ebene gerollt gedacht.

Fischer-Hinnen und Girault berechnen nur L_1 und vernachlässigen L_2 ganz. Arnold dagegen hat L_2 in die Berechnung von L eingeführt und erhält unter der obigen Annahme für

$$L_2 = \int_{r_1}^{r_2} \frac{4\pi w^2}{10} l \cdot \frac{dx}{\pi x} = \frac{w^2 l}{10^8} \cdot 0{,}92 \cdot \lg\left(\frac{r_2}{r_1}\right).$$

r_2 muss aber hier kleiner als r sein, weil wir sonst eine zu grosse Leitfähigkeit bekommen würden. Wenn wir die früher abgeleitete Formel für L_2 mit derjenigen von Arnold vergleichen, so sehen wir, dass beide dieselben konstanten Koeffizienten besitzen, die Werte unter den Logarithmen dagegen verschieden sind. Setzen wir diese Ausdrücke unter den Logarithmen einander gleich und berechnen daraus r_2, so erhalten wir

$$r_2 = \frac{r_1 + \pi r_a}{2}$$

und indem wir diesen Wert in die Arnoldsche Formel einsetzen, bekommen wir für L_2 denselben Wert, den wir durch die frühere Formel 2 gefunden haben, d. h. das Kraftlinienbild von Fig. 1 ist auf einen Halbkreisring mit den Radien r_1 und r_2 reduziert worden, der dieselbe Leitfähigkeit besitzt.

Die Arnoldsche Formel kann also doch richtige Werte von L_2 liefern, trotzdem der Kraftlinienweg nur teilweise berücksichtigt wird; wir müssen nur für die obere Grenze der Integration den Wert

$$r_2 = \frac{r_1 + \pi r_a}{2}$$

einsetzen, der kleiner ist als r. Dieser Wert r_2 gilt aber nur für Durchmesserspulen. Ist die Maschine mehrpolig, so ist die Entfernung der induzierten Seiten einer Spule ungefähr gleich einer Polteilung τ. Es ist mithin

$$r = \frac{\pi \cdot r_a}{p},$$

wo p die Anzahl der Polpaare bedeutet. In diesem Falle erhalten wir für

$$L_2 = \frac{w^2 \cdot l}{10^8} \cdot 0{,}92 \cdot \lg\left(\frac{r_1 + \pi \cdot r_a}{r_1\,(1 + p)}\right).$$

Für r_2 der Arnoldschen Formel gilt somit

$$r_2 = \frac{r_1 + \pi r_a}{1 + p}.$$

Da r_1 gegenüber r_a sehr klein ist, so dürfen wir r_1 vernachlässigen, und es wird dann

$$r_2 = \frac{\pi . r_a}{1 + p}.$$

Ferner ist

$$\pi . r_a = \tau . p,$$

daraus folgt für r_2

$$r_2 = \tau . \frac{p}{1 + p}. \qquad \qquad (4)$$

Indem wir diesen Wert in die Arnoldsche Formel einführen, erhalten wir für den Selbstinduktionskoeffizienten L_2

$$L_2 = \frac{w^2 . l}{10^8} . 0{,}92 . \lg\left(\frac{\tau}{r_1} . \frac{p}{1 + p}\right) = \frac{w^2 l}{10^8} . w^2 . l . \lambda_k,$$

wo

$$\lambda_k = 0{,}92 . \lg\left(\frac{\tau}{r_1} . \frac{p}{1 + p}\right),$$

somit ist

$$L = \frac{w^2 . 2 . l}{10^8}\left[0{,}2 + 0{,}92 \lg\left(\frac{\tau}{r_1} . \frac{p}{1+p}\right)\right] = \frac{w^2 . 2 . l}{10^8}(\lambda_w + \lambda_k). \quad (5)$$

Für die Berechnung des Selbstinductionskoeffizienten der beiden Stirnverbindungen darf die Formel

$$L_3 = \frac{w^2 . 2 . l_s}{10^8}\left[0{,}46 . \lg\frac{l_s}{d_s} - 0{,}11\right] = \frac{w^2 . 2 . l_s}{10^8}\lambda_s, \quad . \quad (6)$$

wo

$$\lambda_s = 0{,}46 \lg\frac{l_s}{d_s} - 0{,}11$$

bedeutet, verwendet werden. Hierin ist (siehe Fig. 2 bis 4):

l_s = Länge einer Stirnverbindung,

d_s = Durchmesser desjenigen Kreises, der denselben Umfang hat, wie die ganze Stirnverbindung, Isolation der Drähte eingerechnet.

Diese Formel ist in einem kürzlich erschienenen Hefte (Sammlung elektrotechnischer Vorträge, herausgegeben von Prof. Dr. Ernst Voit, Bd. III, Heft 1 bis 3) „Beitrag zur Vorausberechnung und Unter-

suchung von Ein- und Mehrphasenstromgeneratoren von E. Arnold und J. L. la Cour, Karlsruhe, Elektrotechnisches Institut der technischen Hochschule“ auf S. 86 abgeleitet worden und zwar unter der Annahme, dass der Einfluss des in der Nähe der Stirnverbindungen sich befindlichen Eisens nicht berücksichtigt wird, dass also dieselben ganz in Luft gedacht sind. Diese Voraussetzung ist berechtigt, denn in der Nähe der Stirnverbindungen haben wir nicht nur lamelliertes Eisen, das die Leitfähigkeit des Kraftflusses erhöht, sondern auch massive Eisenteile. Letztere dämpfen, wie wir später bei den experimentellen Untersuchungen sehen werden, den Kraftfluss sehr stark;

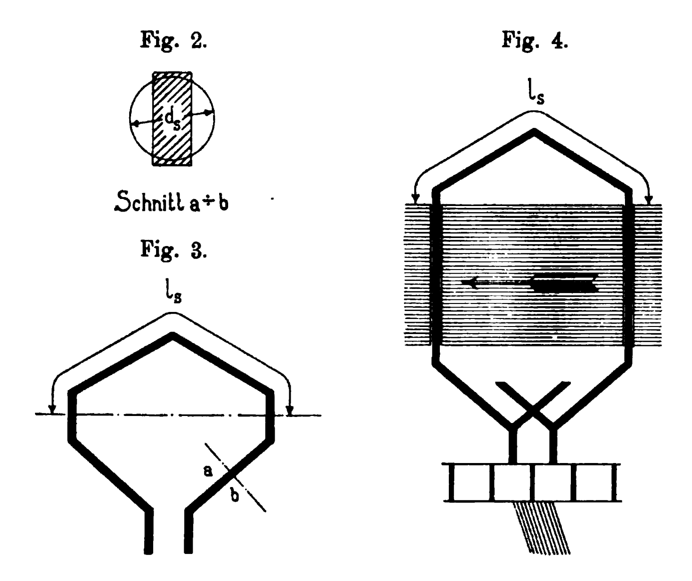


Fig. 2. Fig. 3. Fig. 4.

sie haben also die entgegengesetzte Wirkung vom lamellierten Eisen. Ob sich diese entgegengesetzten Wirkungen ganz aufheben, lässt sich allerdings nicht genau feststellen, weil eine diesbezügliche mathematische Untersuchung ausserordentlich schwierig oder sogar unmöglich ist. Die oben angegebene Formel scheint immerhin, wie die späteren experimentellen Untersuchungen ergeben werden, ganz gute Werte zu liefern.

Der Selbstinduktionskoeffizient der ganzen Spule wird nun

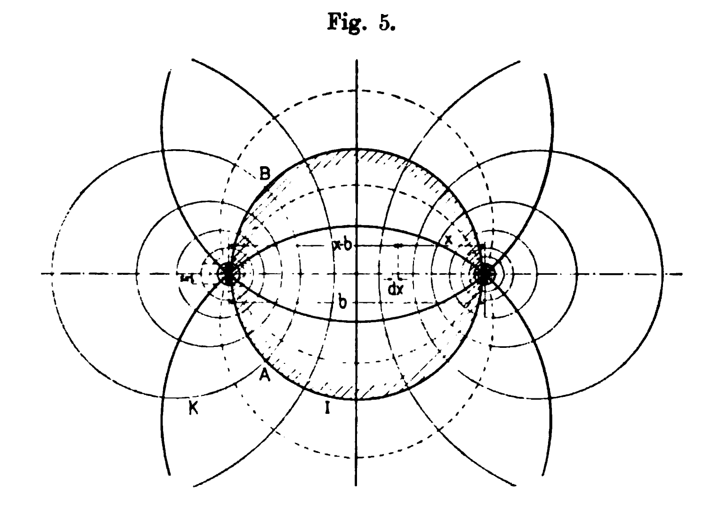
$$L = \frac{w^2 . 2 . l}{10^8} \left[\lambda_w + \lambda_k + \frac{l_s}{l} \lambda_s \right] = \frac{w^2 . 2 . l}{10^8} \lambda . \quad . \quad . \quad (7)$$

λ bedeutet den pro Ampèrewindung und pro Centimeter Armaturlänge erzeugten Kraftfluss, wenn der gesamte Kraftfluss der Spule auf

die doppelte Armaturlänge reduziert ist; oder wir können λ auch als die Leitfähigkeit pro Centimeter Armaturlänge bezeichnen, wenn die gesamte Leitfähigkeit der Spule auf die doppelte Armaturlänge reduziert ist. Dieser Wert ist charakteristisch für die Form des Ankers und der Spule, denn er gestattet uns, die Selbstinduktionskoeffizienten von Spulen verschiedener Armaturen zu vergleichen.

Der Kraftfluss des induzierten Teiles lässt sich noch auf eine andere Weise ermitteln. In Fig. 5 bedeutet $2\,r_1$ die Breite der zwei Spulenseiten einer Spule, welche sich vorläufig in Luft befinden soll. Wenn ein Strom dieselbe durchfliesst, so entsteht das aufgezeichnete

Fig. 5.



Kraftlinienbild und der Kraftfluss $d\,\Phi$ durch das Flächenelement $d\,x$ pro 1 cm Spulenlänge, und bei einem Strome von 1 Ampère wird

$$d\,\Phi = \left(\frac{0{,}2}{x} + \frac{0{,}2}{b-x}\right) d\,x.$$

Der Kraftfluss zwischen den zwei Spulenseiten, der mit allen Windungen einer Spulenseite verkettet ist, wird

$$\Phi_2 = 0{,}2 \left(\int_{r_1}^{b} \frac{1}{x}\, d\,x + \int_{b-r_1}^{0} \frac{1}{b-x}\, d\,x \right) = 0{,}92 \lg \left(\frac{b}{r_1}\right)$$

und wenn die Spule aus w Windungen besteht

$$\Phi = 0{,}92 \,.\, w \,.\, \lg \left(\frac{b}{r_1}\right).$$

Die Niveauflächen von Fig. 5 sind Kreiscylinderflächen, welche sich in der Mitte der beiden Spulenseiten schneiden.

Jede Kraftlinie trifft eine Niveaufläche zweimal, z. B. die Kraftlinie K schneidet die Niveaufläche I in den Punkten A und B. Der Kraftfluss einer Kraftröhre mit dieser Kraftlinie als Mittellinie hat von A nach B denselben Widerstand zu überwinden, wie aussen herum von B nach A. Wenn wir nun die Niveaufläche I mit Eisen ausfüllen, so wird der Kraftfluss Φ aufs doppelte steigen, weil der Widerstand infolge des Eisens nur noch halb so gross ist. Also

$$\Phi = 2 \,.\, 0{,}92 \,.\, w \,.\, \lg\left(\frac{b}{r_1}\right).$$

Der Kraftfluss ist mit w Windungen verkettet, somit ist für die ganze Länge des induzierten Teiles

$$L = 1{,}84 \,.\, l \,.\, w^2 \,.\, \lg\left(\frac{b}{r_1}\right).$$

Hierzu kommt noch die Kraftflussverkettung, die im Innern der zwei Spulenseiten verläuft; dieselbe ist nach früherem

$$L_1 = 2 \,.\, 0{,}2 \,.\, w^2 \,.\, l.$$

Somit wird

$$L = \frac{w^2 \,.\, l \,.\, 2}{10^8}\left[0{,}2 + 0{,}92 \,.\, \lg\left(\frac{b}{r_1}\right)\right].$$

Diese Formel gilt aber nur für glatte Armaturen, denn sobald die Drähte in Nuten liegen, ist die Ankeroberfläche keine Niveaufläche mehr.

b) Ringanker.

Beim Ringanker (siehe Fig. 6) sind für die Berechnung des Selbstinduktionskoeffizienten L einer Spule drei Teile zu unterscheiden:

1. Der induzierte Teil A D,
2. die Verbindungen an den Stirnflächen A B und D C,
3. die Verbindung innerhalb des Ankers B C.

Nach dem Vorhergehenden erhalten wir für

$$L_{AD} = \frac{w^2 \,.\, l}{10^8}\left[0{,}2 + 0{,}92 \,.\, \lg\left(\frac{r_2}{r_1}\right)\right],$$

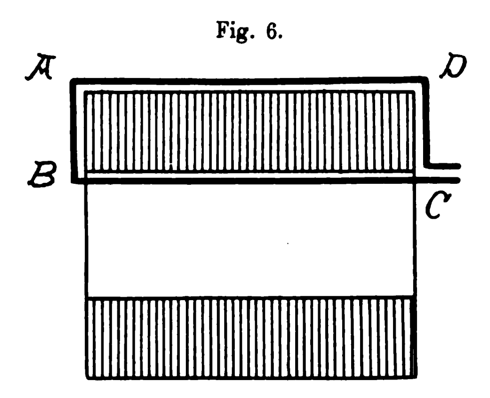
wo

$$r_2 = \frac{r_1 + \pi\, r_a}{2}$$

bedeutet.

Für das Stück A B und D C berücksichtigen wir nur den Kraftfluss, der in die Stirnseite ein- resp. austritt. Wie aus Fig. 7 ersichtlich, ist für die verschiedenen Punkte der Spulenseiten A B und D C der Wert von r nicht mehr konstant, sondern variiert von r_1 bis r_2,

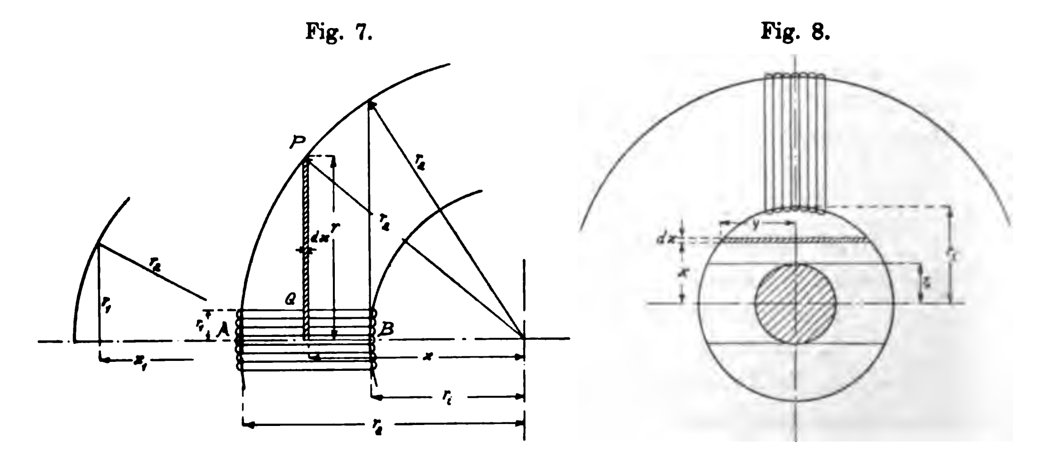
Fig. 6.



d. h. der Punkt P wandert auf dem äusseren Kreis des Ankers. Die Leitfähigkeit des Streifens P Q ist

$$d F_1 = 0{,}4 \,.\, \lg \text{nat} \left(\frac{r}{r_1}\right) d x = 0{,}4 \lg \text{nat} \frac{\sqrt{r_a{}^2 - x^2}}{r_1} d x.$$

Fig. 7. Fig. 8.



Indem wir $\frac{x}{r_a} = \cos \alpha$ substituieren, erhalten wir

$$\int \lg \text{nat} \left(\frac{\sqrt{r_a{}^2 - x^2}}{r_1}\right) d x = - r_a \,.\! \int \lg \text{nat} \left(\frac{r_a \,.\, \sin \alpha}{r_1}\right) \sin \alpha \, d \alpha$$

$$= 2{,}3\ r_a \,.\, \cos\alpha\ \lg\left(\frac{r_2}{r_1}\right) - r_a \int \lg\operatorname{nat}(\sin\alpha)\,.\,\sin\alpha\,.\,d\alpha$$

$$\int \lg\operatorname{nat}(\sin\alpha)\sin\alpha\, d\alpha = +\,2{,}3\cos\alpha\,.\,\lg(\sin\alpha) - \int \frac{\cos^2}{\sin\alpha}\, d\alpha$$

$$-\int \frac{\cos^2\alpha}{\sin\alpha}\, d\alpha = -\int \frac{1}{\sin\alpha}\, d\alpha + \int \sin\alpha\, d\alpha$$

$$= -\,2{,}3\lg\left(\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}\right) - \cos\alpha.$$

Somit wird

$$-\,r_a \int \lg\operatorname{nat}\left(\frac{r_a\,.\,\sin\alpha}{r_1}\right).\sin\alpha\,.\,d\alpha = -\,2{,}3\ r_a \lg\left(\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$-\,r_a\,.\,\cos\alpha + 2{,}3\ r_a\,.\,\cos\alpha\lg\left(\frac{r_a}{r_1}\right) + 2{,}3\ r_a\,.\,\cos\alpha\lg(\sin\alpha).$$

Es ist nun

$$\frac{x}{r_a} = \cos\alpha$$

und daraus folgt für $\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}$

$$\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2} = \frac{\sqrt{r_a^2 - x^2}}{x + r_a};$$

diese Werte eingesetzt gibt

$$\int_{x_1 = \sqrt{r_a^2 - r_1^2}}^{r_i} \lg\operatorname{nat}\frac{\sqrt{r_a^2 - x^2}}{r_1}\, dx = \Bigg[2{,}3\,.\,x\lg\left(\frac{\sqrt{r_a^2 - x^2}}{r_1}\right)$$

$$-\,x - 2{,}3\ r_a\lg\left(\frac{\sqrt{r_a^2 - x^2}}{x + r_a}\right)\Bigg]_{x_1}^{r_i}.$$

Somit wird

$$L_{AB} = \frac{w^2}{10^8}\Bigg\{0{,}2\,(r_a - r_i) + 0{,}4\left[r_a\left(2{,}3\lg\frac{2\,r_a\,r_2}{r_1\,(r_a + r_i)} - 1\right)\right.$$

$$\left. -\,r_i\left(2{,}3\,.\,\lg\frac{r_2}{r_1} - 1\right)\right]\Bigg\} \quad \ldots\ldots \quad (8)$$

In Wirklichkeit wird aber L_{AB} kleiner ausfallen, weil der ins Eisenblech eintretende Kraftfluss durch die entstehenden Wirbelströme gedämpft wird.

Um L_{BC} einfach berechnen zu können, nehmen wir an, dass der Verlauf des Kraftflusses im Innern parallel zur y-Achse erfolge (siehe Fig. 8). Diese Annahme ist berechtigt, da die Leitfähigkeit in diesem Fall ziemlich mit derjenigen des wirklichen Kraftflusses übereinstimmt. Den Kraftfluss, der durch die Achse des Ankers hindurchgeht, darf man vernachlässigen, da derselbe infolge der hohen Periodenzahl fast ganz gedämpft wird. Wir erhalten somit für die Leitfähigkeit im Innern des Ankers pro 1 cm Armaturlänge

$$F_i = 2\int_{r_0}^{r_i} \frac{d\,x}{2\,.\sqrt{r_i^2 - x^2}} = \Big[\arcsin \frac{x}{r_i}\Big]_{r_0}^{r_i} = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{r_o}{r_i}\right).$$

Der Selbstinduktionskoeffizient L_{BC} wird

$$L_{BC} = \frac{w^2\,.\,l\,.\,1{,}25}{10^8}\left[\frac{\pi}{2} - \arcsin\frac{r_o}{r_i}\right]. \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

L_{BC} wird auch etwas kleiner ausfallen, als die Rechnung ergibt, da der bewickelte Anker durch Messingarme getragen wird, die einen Teil des berechneten Kraftflusses dämpfen. Der Selbstinduktionskoeffizient L der ganzen Spule ist also

$$L = L_{AD} + 2\,L_{AB} + L_{BC}.$$

2. Nutenanker.

a) Eine Spulenseite pro Nut.

Liegen die Spulen in Nuten, so können wir bezüglich der Berechnung des Selbstinduktionskoeffizienten derselben zwei Teile unterscheiden:

1. Der induzierte oder der in der Nut gelegene Teil.
2. Die Stirnverbindungen.

Der Kraftfluss, der mit dem ersten Teil verkettet ist, setzt sich aus den Kraftflüssen Φ_α, Φ_β und Φ_γ zusammen:

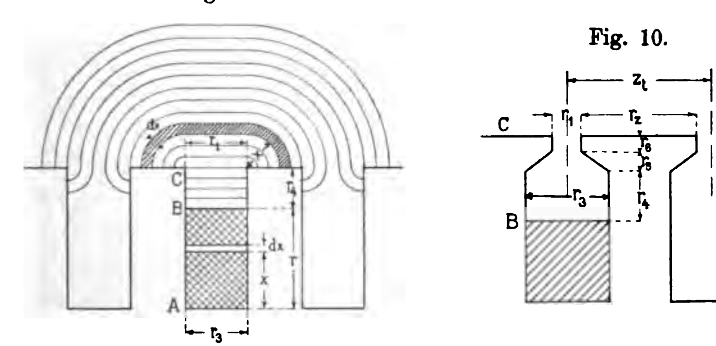
Φ_α verläuft in der Nut und umschlingt die Spule nur teilweise (zwischen A und B, siehe Fig. 9),

Φ_β verläuft in der Nut und umschlingt die Spule ganz (zwischen B und C),

Φ_γ verläuft ausserhalb der Nut und umschlingt die Spule ganz.

Da der Widerstand des Eisens gegenüber dem der Luft wieder vernachlässigt werden kann, und die Nut der ganzen Breite nach bis

hinauf zu B vollständig von der Spulenseite erfüllt ist, so sind wir zur Annahme berechtigt, dass der Kraftlinienweg der Flüsse Φ_α und Φ_β



parallel zur Grundfläche der Nut verläuft. Die Leitfähigkeit des Streifens dF_1 ist

$$dF_1 = \frac{l\,dx}{r_1}$$

und die magnetomotorische Kraft desselben

$$\mathfrak{M}_1 = 0{,}4 \,.\, \pi \,.\, w \,.\, \frac{x}{r}.$$

Dieser Streifen ist mit $w \,.\, \frac{x}{r}$ Windungen verkettet, folglich wird

$$L_\alpha = \frac{0{,}4\,\pi}{10^8} \int_0^r \frac{w\,.\,x}{r} \,.\, \frac{w\,.\,x}{r} \,.\, \frac{l\,.\,dx}{r_3} = \frac{0{,}4\,\pi}{10^8} \,.\, w^2 l \,\frac{r}{3\,r_3}. \quad (10)$$

Für L_β erhält man

$$L_\beta = \frac{0{,}4\,\pi\,w^2}{10^8}\left[\int_0^{r_4} \frac{l\,.\,dx}{r_3} + \int_0^{r_5} \frac{l\,dx}{\frac{r_1 + r_3}{2}} + \int_0^{r_6} \frac{l\,dx}{r_1}\right],$$

$$L_\beta = \frac{0{,}4\,\pi\,.\,w^2\,.\,l}{10^8}\left[\frac{r_4}{r_3} + \frac{2\,r_5}{r_1 + r_3} + \frac{r_6}{r_1}\right]. \quad . \quad . \quad (11)$$

Wenn die Nut offen ist, wird

$$r_1 = r_3 \quad r_5 = 0 \quad r_6 = 0 \quad r_4 = BC,$$

$$L_\beta = \frac{1{,}25\,w^2\,.\,l}{10^8} \,.\, \frac{r_4}{r_1}.$$

Der Kraftfluss Φ_γ wird nicht die Nut durchsetzen, sondern sich nach den Zähnen ziehen (siehe Fig. 9). Beim Nutenanker wird deshalb die Leitfähigkeit für Φ_γ etwas kleiner sein als bei glatten Ankern. Der Unterschied ist jedoch so gering, dass wir ihn nicht zu berücksichtigen brauchen.

$$L_\gamma = \frac{0{,}4\,\pi\,w^2\,l}{10^8} \int_0^{r_2 - \frac{r_1}{2}} \frac{d\,x}{r_1 + \pi\,x} = \frac{0{,}4\,\pi\,w^2\,l}{10^8} \cdot \frac{2{,}3}{\pi} \lg \left[\frac{r_1 + \pi\left(r_2 - \frac{r_1}{2}\right)}{r_1} \right],$$

$$L = \frac{w^2 l \,.\, 0{,}92}{10^8} \lg \left(\frac{\pi \,.\, r_2}{r_1} - 0{,}57 \right),$$

wo

$$r_2 = \tau \,.\, \frac{p}{1+p}.$$

Da r_2 gegenüber r_1 sehr gross ist, so dürfen wir 0,57 vernachlässigen und bekommen

$$L_\gamma = \frac{w^2 \,.\, l \,.\, 0{,}92}{10^8} \,.\, \lg \left(\frac{\pi\, r_2}{r_1} \right). \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

Wenn die Anzahl der Spulenseiten gleich 2 ist, was den meisten praktischen Fällen entspricht, so wird der Selbstinduktionskoeffizient L_1 des induzierten Teiles der Spule

$$L_1 = 2(L_\alpha + L_\beta + L_\gamma),$$

$$L_1 = \frac{w^2 \,.\, 2 l}{10^8} \left[1{,}25 \,.\, \left(\frac{r}{3\,r_3} + \frac{r_4}{r_3} + \frac{2\,r_5}{r_1 + r_3} + \frac{r_6}{r_1} \right) + 0{,}92 \lg . \left(\frac{\pi\, r_2}{r_1} \right) \right]$$

$$= \frac{w^2 \,.\, l \,.\, 2}{10^8} \left[\lambda_n + \lambda_k \right],$$

wo

$$\lambda_n = 1{,}25 \left(\frac{r}{3\,r_3} + \frac{r_4}{r_3} + \frac{2\,r_5}{r_1 + r_3} + \frac{r_6}{r_1} \right); \; \lambda_k = 0{,}92 \lg \left(\frac{\pi\, r_2}{r_1} \right);$$

$$r_2 = \tau \,.\, \frac{p}{1+p}.$$

Der Selbstinduktionskoeffizient der Stirnverbindungen wird nach der auf S. 382 angegebenen Formel 6 berechnet.

$$L_2 = \frac{w^2 \,.\, 2\, l_s}{10^8} \left[0{,}46 \,.\, \lg \frac{l_s}{d_s} - 0{,}11 \right] = \frac{w^2 \,.\, 2 \,.\, l_s}{10^8} \lambda$$

und für die ganze Spule bekommen wir

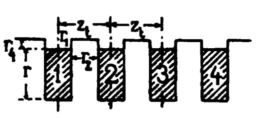
$$L = L_1 + L_2 = \frac{w^2 . 2 . l}{10^8} \left[\lambda_n + \lambda_k + \frac{l_s}{l} \lambda_s\right]. \quad . \quad . \quad (13)$$

b) Eine Spulenseite ist auf mehrere nebeneinander liegende Nuten verteilt.

Nehmen wir an, eine Spulenseite sei gleichmässig auf q nebeneinanderliegende Nuten verteilt.

In Fig. 11 ist q = 4. Um den Selbstinduktionskoeffizienten L einer solchen Spule zu berechnen, verwenden wir den Satz von der Superposition. Wir fangen mit der Nut 1 an und berechnen den Kraftfluss, der nur von diesem Teil der Spulenseite erzeugt wird und nur mit diesem verkettet ist. Die Windungszahl pro Nut ist $\frac{w}{q}$.

Fig. 11.



$$\overset{1}{L_1} = \frac{w^2 . 2 . l}{q^2 . 10^8} \left[1{,}25 \left(\frac{r}{3 r_3} + \frac{r_4}{r_3}\right) + 0{,}92 \lg \left(\frac{\pi . z_t}{r_1}\right)\right].$$

Bei $\overset{1}{L_1}$ bedeutet der Index unten denjenigen Spulenteil, der den Kraftfluss erzeugt und der obere diejenigen Spulenteile, die von diesem umschlungen werden.

Für den Kraftfluss, welcher von den Ampèrewindungen der Nut 1 erzeugt wird und Nut 1 und 2 umschlingt, ist

$$\overset{1+2}{L_1} = \frac{w}{q} . 2 . \frac{w}{q} . \frac{2 l}{10^8} . 0{,}92 \lg \left(\frac{\pi 2 z_t}{2 z_t}\right) = \frac{1{,}73 w^2 . l}{10^8 . q^2}.$$

Und für

$$\overset{1+2+3}{L_1} = \frac{w}{q} . 3 . \frac{w}{q} . \frac{2 l}{10^8} . 0{,}92 \lg \left(\frac{\pi 3 z_t}{4 z_t}\right) = \frac{2{,}06 w^2 l}{10^8 . q^2}.$$

Allgemein

$$\overset{1+2+\ldots x}{L_1} = \frac{w}{q} . x . \frac{w}{q} . \frac{2 l}{10^8} . 0{,}92 \lg \left[\frac{\pi x}{2(x-1)}\right].$$

Wenn x = q ist, so müssen wir integrieren bis $r_2 = \tau . \frac{p}{1+p}$,

$$\overset{1+2+\ldots q}{L_1} = \frac{w^2 l}{10^8} . 0{,}92 \lg \left(\frac{\pi . \tau}{2(q-1)} . \frac{p}{1+p}\right).$$

Jetzt ermitteln wir die verschiedenen Kraftflüsse, die von der Spule 2 erzeugt werden und zwar gerade so wie vorhin bei der Spule 1.

$$L_2^2 = \frac{w^2 \cdot l}{q^2 \cdot 10^8} \left[1{,}25 \left(\frac{r}{3 r_1} + \frac{r_4}{r_1}\right) + 0{,}92 \lg \left(\frac{\pi z_t}{r_1}\right)\right],$$

$$L_2^{1+2+3} = \frac{w^2 \cdot l}{q^2 \cdot 10^8} \cdot 3 \cdot 0{,}92 \lg (\pi),$$

$$L_2^{2+1+3+4} = \frac{w^2 \cdot l}{q^2 \cdot 10^8} \cdot 4 \cdot 0{,}92 \lg \left(\frac{3}{4} \pi\right),$$

$$L_2^{2+1+3+\ldots x} = \frac{w^2 \cdot l}{q^2 \cdot 10^8} \cdot x \cdot 0{,}92 \cdot \lg \left[\frac{x(x-1)}{2(x-2)}\right],$$

$$L_2^{2+1+3+\ldots q} = \frac{w^2 \cdot l}{q^2 \cdot 10^8} \cdot q \cdot 0{,}92 \lg \left[\frac{\pi}{2(q-2)} \cdot \tau \cdot \frac{p}{1+p}\right].$$

Indem wir so fortfahren, die verschiedenen L für alle q Teile der Spulenseite zu ermitteln und diese dann addieren, bekommen wir den Selbstinduktionskoeffizienten der ganzen Spulenseite. Eine allgemeine einfache Formel, welche alle diese L in sich einschliesst, lässt sich nicht aufstellen. Es ist am einfachsten, diese verschiedenen L in der angedeuteten Weise einzeln zu berechnen und dann zu addieren. Indem wir noch die Summe mit der Anzahl der Spulenseiten multiplizieren und den Selbstinduktionskoeffizienten sämtlicher Stirnverbindungen hinzu addieren, erhalten wir den Selbstinduktionskoeffizienten der ganzen Spule.

Dadurch, dass die Spulenseite auf q Nuten verteilt ist, wird der Selbstinduktionskoeffizient der ganzen Spule kleiner, als wenn sämtliche Windungen einer Spulenseite in derselben Nut liegen würden. Im letzteren Falle erhält man für die Verkettung des Kraftflusses in der Nut

$$L = \frac{w^2 \cdot l}{10^8} [\lambda_n],$$

und wenn eine Spulenseite auf q Nuten verteilt ist

$$L = \frac{w^2 \cdot l}{q^2 \cdot 10^8} q \cdot \lambda_n = \frac{w^2 l}{10^8} \frac{\lambda_n}{q} = \frac{w^2 \cdot l}{10^8} \lambda_n' \quad . \; . \; . \quad (14)$$

λ_n', d. h. die Leitfähigkeit pro Centimeter Armaturlänge oder der Kraftfluss pro A.W. und pro Centimeter Armaturlänge ist q mal kleiner geworden. Die Verkettung des Kraftflusses ausserhalb der

Nut ist, wenn die Spulenseite in q Nuten liegt, auch kleiner, als wenn alle ihre Windungen sich in einer Nut befinden; denn ein Teil des Kraftflusses umschlingt nicht alle Windungen, wie dies der Fall wäre, wenn die ganze Spulenseite in einer Nut liegen würde. Dieses Sinken von λ_n' mit Grösserwerden von q ist von Parshall und Hobart experimentell sehr schön nachgewiesen worden (siehe S. 431 u. f.).

c) Mehrere Spulenseiten pro Nut.

In diesem Falle wird der Kraftfluss, der von einer Spulenseite erzeugt wird, nicht mehr den einfachen Verlauf haben, wie vorhin, wo die Nut von der Spulenseite ganz erfüllt war. Um das richtige Kraftlinienbild zu bekommen, müsste man nach dem Gefühl verschiedene solche Bilder entwerfen, und dasjenige als das richtige annehmen, das die grösste magnetische Leitfähigkeit besitzt. Eine solche Ermittelung von L ist aber sehr umständlich und zeitraubend. Um doch rasch die Selbstinduktion der in der Nut gelegenen Spulenseite zu erhalten, nehmen wir daher denselben Verlauf des Kraftflusses wie in Fig. 9 an; dadurch erhalten wir allerdings einen etwas zu kleinen Wert, was auch die spätere experimentelle Untersuchung bestätigen wird. Unter dieser Annahme wird der Selbstinduktionskoeffizient der in der Nut gelegenen Spulenseite

$$L_1 = \frac{w^2 . l}{10^8}\left[1{,}25\left(\frac{r}{3\,r_3} + \frac{r_4}{r_3} - \frac{2\,r_5}{r_1 + r_3} + \frac{r_6}{r_1}\right) + 0{,}92\,\lg\left(\frac{\pi\, r_2}{r_1}\right)\right],$$

wo

$$r_2 = \tau . \frac{p}{1 + p}$$

bedeutet.

II. Berechnung des gegenseitigen Induktionskoeffizienten M.

Den gegenseitigen Induktionskoeffizienten M zweier Spulen erhalten wir, indem wir die gemeinsame Kraftflussverkettung berechnen, die entsteht, wenn in einer der beiden Spulen ein Strom von 1 Ampère fliesst. Die Annahmen über den Verlauf des Kraftflusses, der von einer Spule erzeugt wird, sollen dieselben sein wie früher.

1. Die zwei Spulen sind in derselben Nut.

a) Uebereinander (siehe Fig. 12).

Wenn nun in einer der beiden Spulen ein Strom von 1 Ampère fliesst, so ist die Kraftflussverkettung der beiden Spulen für $u = 2$

$$M = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot w}{10^8} \, l \cdot 2 \cdot \int_0^r \frac{w}{r} x \cdot \frac{dx}{r_1} + \frac{0,4 \pi \cdot 2}{10^8} \cdot w^2 \cdot l \cdot \frac{r_4}{r_1}$$

$$+ \frac{w^2 \cdot l \cdot 2}{10^8} \, 0,92 \lg \left(\frac{\pi \cdot \tau \frac{p}{1+p}}{r_1} \right),$$

$$M = \frac{w^2 \cdot l \cdot 2}{10^8} \left[\frac{1,25 \, r}{2 \, r_1} + \frac{1,25 \, r_4}{r_1} + 0,92 \lg \left(\frac{\pi \cdot \tau \frac{p}{1+p}}{r_1} \right) \right],$$

$$M = \frac{w^2 \cdot l \cdot 2}{10^8} \left[\frac{1,25}{r_1} \left(\frac{r}{2} + r_4 \right) + 0,92 \lg \left(\frac{\pi \cdot \tau \frac{p}{1+p}}{r_1} \right) \right]. \quad (15)$$

Fig. 12.

Fig. 13.

b) Nebeneinander (siehe Fig. 13).

Hier erhalten wir für M

$$M = \frac{w^2 \cdot l \cdot 2}{10^8} \left[1,25 \left(\frac{r}{3 \, r_1} + \frac{r_4}{r_1} + 0,92 \lg \left(\frac{\pi \cdot \tau \frac{p}{1+p}}{r_1} \right) \right]. \quad (16)$$

2. Die zwei Spulen liegen in verschiedenen Nuten (siehe Fig. 14).

In diesem Falle wird M

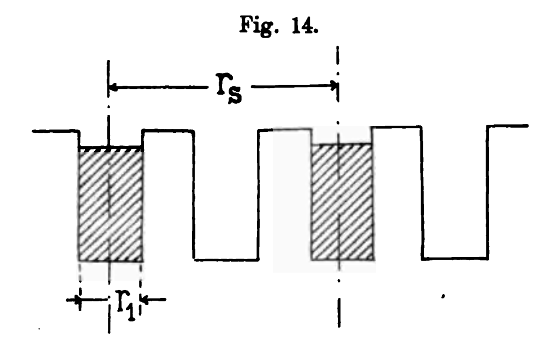
$$M = \frac{w^2 \cdot l \cdot 2}{10^8} \cdot 0,92 \left[\lg \left(\frac{\pi \, r_2}{r_1} - 0,57 \right) - \lg \left(\frac{\pi \, r_8}{r_1} - 0,57 \right) \right],$$

$$M = \frac{w^2 \cdot l \cdot 2}{10^8} \cdot 0,92 \left[\lg \frac{\pi \cdot \tau \frac{p}{1+p} - r_1 \cdot 0,57}{\pi \cdot r_8 - r_1 \cdot 0,57} \right].$$

Wenn wir $r_1 . 0{,}57$ vernachlässigen, erhalten wir

$$M = \frac{w^2 . l . 2}{10^8} 0{,}92 \left[\lg \left(\frac{r_2}{r_s} \right) \right]. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (17)$$

Fig. 14.



3. Die zwei Spulen sind je auf mehrere Nuten verteilt.

Um den gegenseitigen Induktionskoeffizienten bei dieser Anordnung zu erhalten, verfahren wir wie auf S. 391. Man bestimmt die Kraftflüsse der einzelnen, in verschiedenen Nuten gelegenen Teile der einen Spule und deren Verkettungen mit der anderen Spule. Die Summe dieser Verkettungen ergibt dann den gesuchten gegenseitigen Induktionskoeffizienten M der beiden Spulen.

4. Es liegen mehrere Spulenseiten in derselben Nut.

Wenn die Spulenseiten von mehreren gleichzeitig kurzgeschlossenen Spulen in derselben Nut liegen, so bekommen wir den gegenseitigen Induktionskoeffizienten einer Spulenseite mit allen übrigen, wenn wir die Kraftflussverkettung dieser Spulenseite mit jeder anderen einzeln berechnen und alle addieren. Da die Berechnung dieser Verkettung ganz ähnlich den früheren ist, so wird es nicht notwendig sein, dieselbe hier nochmals besonders durchzuführen.

III. Berechnung des scheinbaren Selbstinduktionskoeffizienten L_s.

Der scheinbare Selbstinduktionskoeffizient L_s kann nur angenähert nach der Formel

$$L_s = L - \Sigma \left(\frac{M^2}{L} \right)$$

berechnet werden. Eine genauere Bestimmung desselben lässt sich nicht angeben, da durch die dämpfende Wirkung der kurzgeschlossenen Spulen das Feld so deformiert wird, dass es der Rechnung nicht mehr gut zugänglich ist.

B. Experimentelle Bestimmung der Induktionskoeffizienten.

Die experimentelle Untersuchung von L und M hat ergeben, dass die oben berechneten Werte zum Teil sehr gut mit den experimentell ermittelten übereinstimmen, zum Teil einige Abweichungen zeigen, die aber nicht bedeutend sind. Eine so gute Uebereinstimmung konnte kaum erwartet werden, da die Kraftflussverteilung in Wirklichkeit doch viel komplizierter ist, als hierfür die Berechnung angenommen wurde und sehr stark beeinflusst und verzerrt wird durch die in den massiven Eisenteilen induzierten Wirbelströme.

1. Der Selbstinduktionskoeffizient L von Ankerspulen.

Der Selbstinduktionskoeffizient L lässt sich am besten mit Wechselstrom bestimmen. Es ist

$$J_1 = \frac{E_1}{\sqrt{R^2 + (2\pi c L)^2}},$$

J_1 = effektive Stromstärke in Ampère,
E_1 = effektive Spannung in Volt,
R = Ohmscher Widerstand.
c = Periodenzahl des Wechselstromes,
L = Selbstinduktionskoeffizient der Ankerspule in Henry.

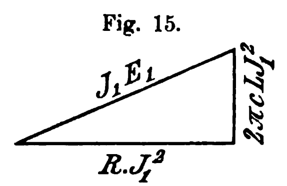
E_1, J_1 und R können wir messen, c ist uns aus der Tourenzahl und Polzahl gegeben, folglich bleibt nur noch L als Unbekannte.

$$L = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot c} \sqrt{\left(\frac{E_1}{J_1}\right)^2 - R^2}.$$

Da sich in der Nähe der Spule, deren Selbstinduktionskoeffizient wir bestimmen wollen, Eisen befindet, so wird die Genauigkeit der Messung sehr beeinträchtigt werden: denn es wird nicht nur im Stromkreise Energie verbraucht, sondern auch im benachbarten Eisen. Dieser zur Jouleschen Wärme des Stromkreises hinzu gekommene Energieverlust rührt von der magnetischen Hysteresis des Eisens und den in ihm und in der Leitung auftretenden Wirbelströmen her. Diese Erhöhung des Energieverlustes können wir dadurch berücksichtigen, dass

wir statt des Ohmschen Widerstandes den sogenannten effektiven Widerstand einführen, der dann ein Mass für den ganzen Energieverbrauch, sowohl im Stromkreis als auch ausserhalb desselben ist, während der Ohmsche Widerstand uns nur die Joulesche Wärme im Stromkreis allein gibt. Der Ohmsche Widerstand ist eine Konstante des Stromkreises, die nur von der Temperatur abhängt; der effektive Widerstand ist grösser als der Ohmsche. Probeversuche ergaben, dass er um ca. 8 bis 10 % grösser war als der Ohmsche, was den Wert von L merklich beeinflusst. Der effektive Widerstand ist keine Konstante des Stromkreises, sondern hängt vom Strome und der Periodenzahl desselben ab. Um den Selbstinduktionskoeffizienten einer Spule genau zu bekommen, müssen wir daher den effektiven Widerstand berücksichtigen und zwar geschieht dies dadurch, dass wir ausser der Messung des Stromes und der Spannung noch den zugehörigen Wattverbrauch W der Spule ermitteln. Es ist

Fig. 15.



$$J_1 = \frac{E_1}{\sqrt{R^2 + (2\pi c L)^2}},$$

$$J_1 . E_1 = J_1^2 . \sqrt{R^2 + (2\pi c L)^2} = \sqrt{(J_1^2 R)^2 + (2\pi c L J_1^2)^2},$$

$$(J_1^2 R)^2 + (2\pi c L J_1^2)^2 = (J_1 . E_1)^2.$$

$J_1^2 . R$ ist die Wattkomponente,

$2\pi c L J_1^2$ ist die wattlose Komponente des Energiedreiecks (Fig. 15).

$R J_1^2$ ist gleich dem gemessenen Gesamtenergieverbrauch W. Wir erhalten nun für L

$$L = \frac{\sqrt{(J_1 . E_1)^2 - W^2}}{2\pi c J_1^2}.$$

Dieser Ausdruck lässt sich noch vereinfachen, indem wir die Phasenverschiebung φ einführen. Es ist

$$\frac{W}{J_1 . E_1} = \cos\varphi;$$

oben eingesetzt, ergibt

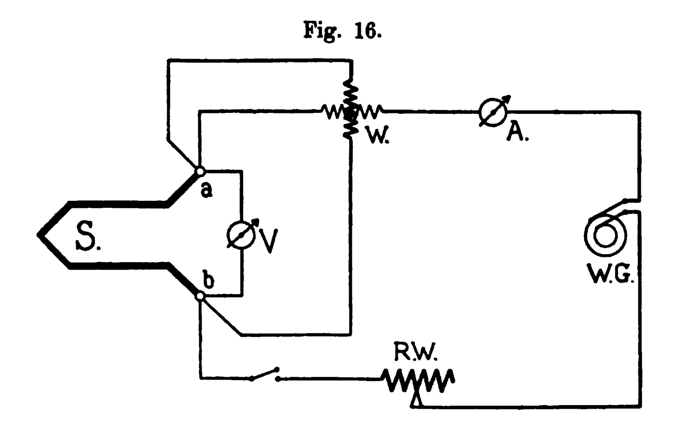
$$L = \frac{J_1 . E_1 \sqrt{1 - \cos^2\varphi}}{2\pi c J_1^2} = \frac{E_1 . \sin\varphi}{2\pi c J_1}. \quad . \quad . \quad (18)$$

In Fig. 16 ist das Schaltungsschema für die experimentelle Bestimmung von L angegeben.

S = Spule, deren Selbstinduktionskoeffizient zu messen ist,
a und b = Enden der Spule S,
V = Voltmeter,
W = Wattmeter,
A = Ampèremeter,
RW = Regulierwiderstand,
WG = Wechselstromgenerator.

Als Ampèremeter wurde ein Hitzdrahtampèremeter von Hartmann & Braun mit einem Messbereich von 35 Ampère verwendet,

Fig. 16.



das im Laufe der Untersuchungen mehrmals mit Gleichstrom geaicht wurde.

Zur Messung der Spannung wurde ein Westonvoltmeter für Wechselstrom benutzt, das durch Umstöpseln auf zwei Messbereiche geschaltet werden konnte, nämlich auf 0,5 bis 7,5 und auf 1 bis 15 Volt. Mittels eines Kompensators von Siemens & Halske wurde dieses Instrument zweimal geaicht. Die kleinen Spannungen der gegenseitigen Induktion wurden mit einem Elektrometer von Carpentier ermittelt.

Als Wattmeter kam ein Torsionsdynamometer von Siemens & Halske zur Anwendung. Geaicht wurde es mit der Stromwage und zwar für den Messbereich und dieselben Verhältnisse, wie sie bei den Untersuchungen in Frage kamen.

Der Strom, der in der Spule S fliesst, ist genau genommen gleich dem Strome, der durch das Ampèremeter geht, vermindert

um die Ströme der Spannungsspule des Wattmeters und des Voltmeters. Da aber diese Ströme gegenüber dem Gesamtstrome J_1 ausserordentlich klein sind, so darf man sie vernachlässigen.

2. Der gegenseitige Induktionskoeffizient M von Ankerspulen.

Den gegenseitigen Induktionskoeffizienten zweier Spulen erhalten wir, indem wir durch die eine Spule einen Strom von bekannter Grösse und Periodenzahl (J_1, c) hindurchschicken und die induzierte Spannung in der zweiten Spule messen; diese sei gleich E_2. Dann ist der gegenseitige Induktionskoeffizient der beiden Spulen

$$M = \frac{E_2}{2 \pi c J_1}.$$

Das Messinstrument für E_2 muss einen möglichst grossen Widerstand haben, damit der Voltmeterstrom sehr klein ist, und dessen dämpfende Wirkungen die Messung praktisch nicht beeinflussen können.

3. Der scheinbare Selbstinduktionskoeffizient L_s von Ankerspulen.

Bei der experimentellen Bestimmung des scheinbaren Selbstinduktionskoeffizienten L_s verfahren wir genau so, wie bei der Bestimmung von L. Der Unterschied besteht nur darin, dass wir diejenigen Spulen, bezüglich welchen wir den scheinbaren Selbstinduktionskoeffizienten L_s einer Spule bestimmen wollen, kurz schliessen.

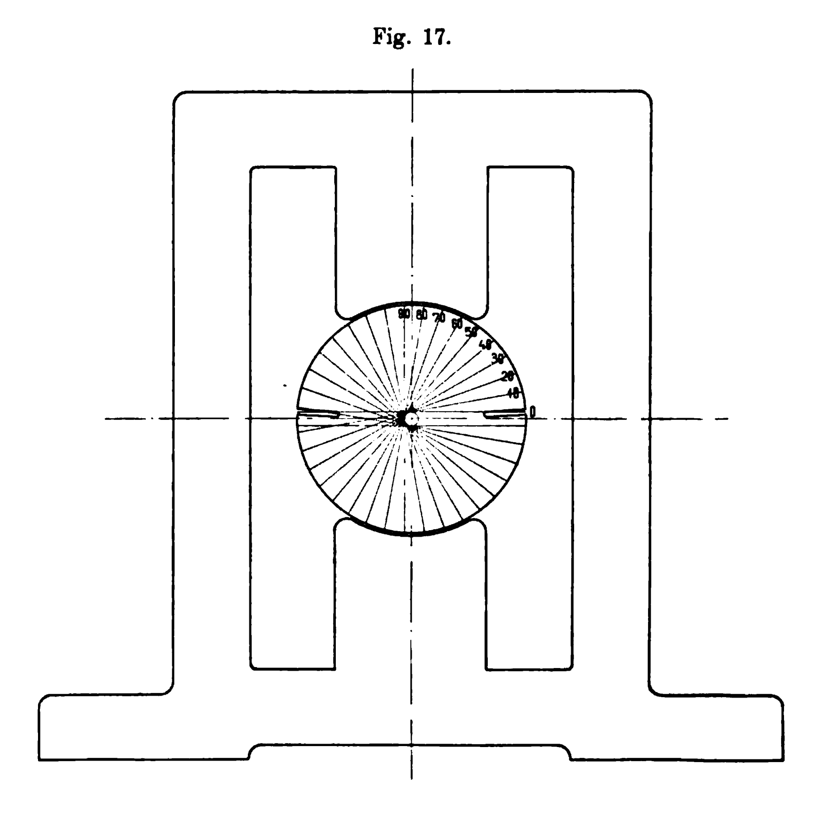
I. Untersuchung der Induktionskoeffizienten an einer Gleichstrommaschine von Geist.

Diese Maschine ist in Fig. 17 skizziert. Ihre wichtigsten Abmessungen sind:

Durchmesser der Armatur	122,8 mm
Durchmesser des Feldes	125,2 „
Länge der Armatur	166,0 „
Anzahl der Nuten	60
Abmessungen einer Nut (siehe Fig. 18)	
Ankerwickelung	Schleifenwickelung
Spulenseiten pro Nut	1
Anzahl der Spulen	30
Wickelungsschritte	$y_1 = 27$
	$y_2 = 29$
Anzahl der Windungen pro Nut	8
Kollektorlamellenzahl	30

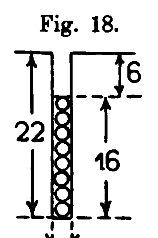
Um den Selbstinduktionskoeffizienten einer Spule zu untersuchen, lösen wir die Verbindungen derselben mit dem Kollektor; dadurch wird

Fig. 17.



die übrige Wickelung geöffnet. Nun schicken wir durch die Spule einen Wechselstrom von bestimmter Periodenzahl; durch Strom-, Spannungs- und Wattmessung lässt sich dann L in oben angegebener Weise leicht bestimmen. Die Ermittelung von L geschieht zuerst für den Fall, dass sich die Armatur ausserhalb des Feldes befindet.

Fig. 18.



1. Die Armatur ist aus dem Felde herausgenommen.

Bevor wir den Selbstinduktionskoeffizienten definitiv bestimmen, wollen wir zuerst die Abhängigkeit desselben vom Strome und der Periodenzahl feststellen. Es zeigte sich, dass L für Perioden von $c = 30$ bis 150 und Ströme von 15 bis 30 Ampère konstant bleibt. Der Grund hierfür liegt darin, dass der von der Spule

erzeugte Kraftfluss teilweise durch die Luft verläuft; infolgedessen ist die Sättigung der Zähne sehr gering und somit konstant.

Wenn der Kraftfluss nicht ganz im Eisen verläuft, sondern wenn der Weg desselben durch eine Luftstrecke, die 1 % vom Weg im Eisen ausmacht, unterbrochen ist, so bleibt der gesamte magnetische Widerstand praktisch konstant, vorausgesetzt, dass die Sättigung des Eisens noch nicht erreicht ist. In unserem Falle ist der Luftzwischenraum, den der Kraftfluss passieren muss, im Verhältnis zum mittleren Weg im Eisen aber erheblich grösser als 1 %.

Der mittlere Kraftlinienweg im Eisen beträgt ungefähr 30 mm.

Der Luftzwischenraum ist 2,5 mm oder 8,3 % vom Weg im Eisen.

L ist also für Werte von J, welche das Eisen in den Zähnen noch nicht sättigen, konstant, was auch die Untersuchung bestätigt hat.

Für den Selbstinduktionskoeffizienten L einer Ankerspule der Maschine von Geist haben sich für den Fall, dass der Anker sich in Luft befindet, folgende Werte ergeben:

J_1	E_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L
15,2	1,22	13,5	18,8	0,750	0,661	0,000164
20,5	1,59	24,1	31,9	0,756	0,656	0,000165
24,8	1,99	37,4	49,4	0,757	0,655	0,000165

Die Periodenzahl des Wechselstromes ist für alle Untersuchungen, wenn nichts Specielles bemerkt wird, stets 50.

Wenn wir L dieser Spule nach Formel 13 S. 391

$$L = \frac{w^2 . 2 . l}{10^8} \left[\lambda_n + \lambda_k + \frac{l_s}{l} . \lambda_s \right]$$

berechnen, erhalten wir

$$\lambda_n = 1,25 \left(\frac{r}{3 r_1} + \frac{r_4}{r_1} \right) = 1,25 \left(\frac{17}{7,5} + \frac{5}{2,5} \right) = 1,25 . 4,27 = \mathbf{5,33},$$

$$\lambda_k = 0,92 . \lg \left(\frac{\pi r_2}{r_1} \right); \quad r_2 = \tau . \frac{p}{1 + p} = \frac{1}{2} \pi r_a ,$$

$$r_2 = \frac{3,14 . 61,4}{2} = 96,5 \text{ mm} ,$$

$$\lambda_k = 0,92 \lg \frac{303}{2,5} = 0,92 . 2,084 = \mathbf{1,91} ,$$

$$\lambda_s = 0{,}46 \lg \frac{l_s}{d_s} - 0{,}1; \quad l_s = 150 \text{ mm}, \; d_s = 11{,}8 \text{ mm},$$

$$\frac{l_s}{l} \cdot \lambda_s = \frac{150}{167} \left[0{,}46 \lg \frac{150}{11{,}8} - 0{,}1 \right] = 0{,}9 \cdot 0{,}51 = \mathbf{0{,}45},$$

$$L = \frac{8^2}{10^8} \cdot 2 \cdot 16{,}6\,[5{,}33 + 1{,}91 + 0{,}45] = \frac{8^2}{10^8} \cdot 2 \cdot 16{,}6 \cdot 7{,}7 = \mathbf{0{,}000163.}$$

Hieraus ersieht man, dass die von Arnold aufgestellte Formel zur Berechnung von L bei schmalen und tiefen Nuten Werte ergibt, die mit den experimentell ermittelten mit grosser Genauigkeit übereinstimmen.

2. Der Anker befindet sich im Felde.

a) Das Feld ist unerregt und die Erregerentwickelung offen.

Der Anker ist im Felde so gelagert, dass die beiden Spulenseiten zwischen die Pole zu liegen kommen (siehe Fig. 17, Lage 0°). Wenn wir nun durch die Spule einen Wechselstrom hindurchschicken, so erhalten wir folgenden Wert:

$$L = 0{,}000210.$$

Diese Vergrösserung von L rührt daher, dass zu dem früheren Kraftfluss noch ein neuer hinzugekommen ist, der sich durchs Feld schliessen kann. Bevor wir aber auf die Grösse desselben näher eingehen, wollen wir zuerst die Aenderung des Selbstinduktionskoeffizienten einer Ankerspule verfolgen, die eintritt, wenn der Anker gedreht wird. Die verschiedenen Lagen der Spule, bei welchen wir L gemessen haben, sind in Fig. 17 markiert. 0° ist die Anfangsstellung der Spule. In dieser Lage steht die Ebene derselben senkrecht zur Achse der Pole. Wenn α den Winkel bedeutet, um welchen die Ebene der Spule von der Anfangsstellung abweicht, so ergeben sich für die verschiedenen Werte von α folgende L:

J_1	E_1	W	$J_1 \cdot E_1$	cos φ	sin φ	L	α
18,95	1,75	22,8	33,2	0,687	0,726	0,000210	0
18,9	1,74	22,8	32,9	0,694	0,719	0,000210	10
18,9	1,74	22,5	32,9	0,684	0,729	0,000210	20
18,7	1,71	22,5	32,0	0,702	0,712	0,000207	30
18,7	1,70	22,5	31,8	0,708	0,706	0,000204	40
18,7	1,72	22,5	32,2	0,699	0,715	0,000209	50

J_1	E_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L	α
18,6	1,88	22,5	35,0	0,643	0,766	0,000247	60
18,6	2,04	23,3	38,0	0,613	0,790	0,000276	65
18,5	2,24	24,8	41,5	0,597	0,802	0,000303	70
18,5	2,44	25,6	45,2	0,566	0,824	0,000346	75
18,45	2,56	26,4	47,4	0,558	0,830	0,000381	80
18,4	2,69	27,2	49,5	0,550	0,836	0,000388	85
18,3	2,78	27,9	50,5	0,552	0,834	0,000402	90
18,05	2,76	27,3	49,7	0,550	0,836	0,000408	95
18,0	2,78	27,5	50,0	0,550	0,836	0,000412	100
18,0	2,82	26,8	50,6	0,530	0,848	0,000416	105
18,1	2,79	26,0	50,5	0,515	0,857	0,000416	110
18,0	2,51	23,4	45,2	0,518	0,856	0,000380	120
18,0	2,18	22,5	39,3	0,573	0,819	0,000316	125
18,1	1,76	21,4	32,2	0,665	0,747	0,000235	140

Diese Werte sind in Fig. 19 (Kurve A) graphisch aufgetragen. Aus derselben ersieht man, dass L bis zu 20° konstant bleibt, dann etwas sinkt und hierauf rasch zunimmt. Der Grund für diese Abnahme von L zwischen 20° und 50° liegt darin, dass in der Nulllage der Spule ihre magnetische Leitfähigkeit wegen der Nähe des Joches etwas erhöht wird. Indem wir nun den Anker drehen, entfernen sich die Spulenseiten vom Joch, die magnetische Leitfähigkeit wird etwas geringer und nimmt erst wieder zu, wenn die Spulenseiten sich den Polecken wieder nähern. Von hier ab wächst L rasch zu einem Maximum an. Diese erhebliche Vergrösserung von L, wenn die Spulenseiten unter die Pole gelangen, rührt davon her, dass die magnetische Leitfähigkeit sich bedeutend erhöht hat, denn abgesehen vom Luftzwischenraum zwischen Anker und Pol, sind die Spulenseiten ganz von Eisen umgeben. Da die Ankerspule nicht genau Durchmesserspule ist, so tritt das Maximum von L nicht schon bei 90°, sondern erst bei etwa 105° ein. Wenn wir noch weiter drehen, fällt die Kurve rasch ab.

b) Das Feld ist normal erregt.

Dann ergeben sich folgende Werte:

J_1	E_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L	α
18,0	1,52	18,2	27,4	0,667	0,745	0,000203	0
18,1	1,53	18,2	27,7	0,658	0,753	0,000202	10

J_1	E_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L	α
18,2	1,54	18,2	28,0	0,650	0,759	0,000204	20
18,1	1,54	18,2	27,9	0,652	0,758	0.000205	30
18,1	1,54	18,2	27,9	0,652	0,758	0,000205	40
18,0	1,43	17,4	25,8	0,674	0,739	0,000187	50
18,0	1,38	17,4	24,8	0,701	0,713	0,000174	58
18,0	1,36	17,4	24,5	0,711	0,703	0,000170	64
18,1	1,36	17,8	24.6	0,724	0,699	0,000169	70
18,35	1,39	19,0	25,5	0,745	0.667	0,000169	75
18,5	1,44	19,4	26,7	0,728	0,685	0,000170	80
18,6	1,47	20,2	27,4	0,738	0,674	0,000170	85
18,6	1,48	20,2	27,6	0,733	0,680	0,000172	90
18,6	1,48	20,2	27,6	0,733	0,680	0,000172	100
18,3	1,46	19,8	27,2	0,728	0,685	0,000174	110

Dadurch, dass man das Feld erregt, sinkt also der Wert von L in der Nulllage von 0,000210 auf 0,000203 ab. Wie obige Tabelle zeigt, nimmt L von 0 bis 40° ein wenig zu und fällt dann, sobald die Spule in den Bereich des Poles kommt, wieder sehr rasch ab bis zu einem Minimalwert von L = 0,000169. Dieses starke Fallen rührt von der Sättigung der Zähne und des Ankereisens her. die den magnetischen Widerstand im Eisen bedeutend erhöht, und somit L sinken macht (siehe Fig. 19, Kurve B).

Wie wir vorhin schon bemerkt haben, schliesst ein Teil des Kraftflusses sich durchs Joch und zwar ist dessen Grösse abhängig

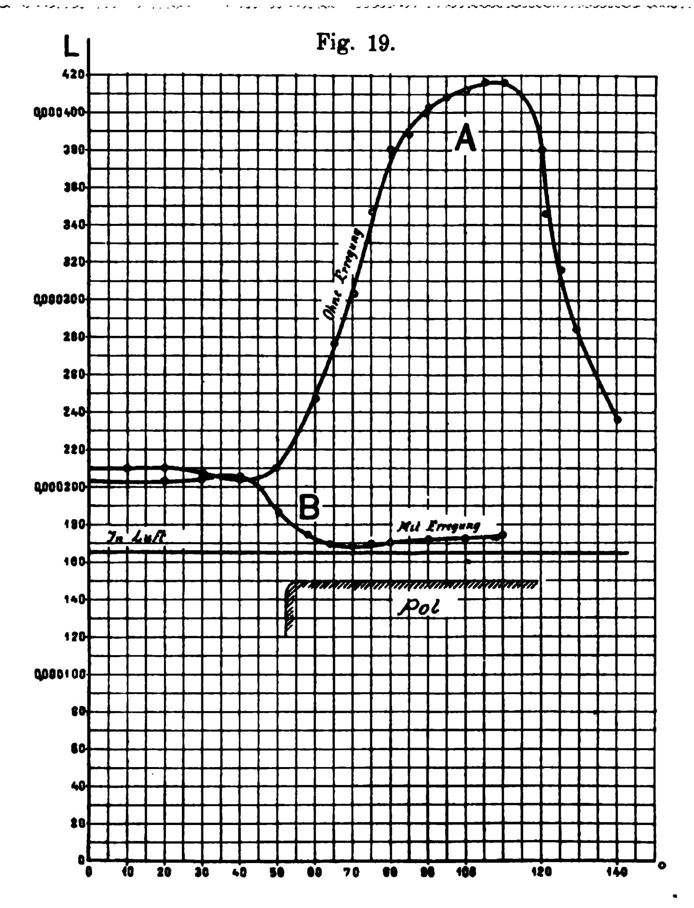
1. von der Lage der Spule gegenüber dem Pol.

In der Nulllage wird er den grössten Wert haben, und wenn die Ebene der Spule parallel zur Achse der Pole ist, so wird er praktisch gleich Null sein.

2. Von der Periodenzahl.

Der wechselnde Kraftfluss, der durch das Feld sich schliesst, erzeugt in den massiven Eisenkernen im Joch und in der Erregerwickelung, wenn diese geschlossen ist, Wirbelströme, die auf den eintretenden Kraftfluss dämpfend zurückwirken und ihn dadurch zum grössten Teil vernichten. Und da die Wirbelströme mit der Periodenzahl proportional zunehmen, so wird der Kraftfluss, der sich durch das Joch schliesst, um so mehr reduziert, je grösser die Periodenzahl ist. Der Selbstinduktionskoeffizient der Ankerspule wurde bei einer Periodenzahl von c = 50 ermittelt. In Wirklichkeit ist dieselbe bei dieser Maschine gleich 425. Der Wert L = 0,000210, den die Spule

Fig. 19.



in der Nulllage bei c = 50 besitzt, wird somit zu gross sein. Bei vorliegendem Versuch war es leider nicht möglich, den Selbstinduktionskoeffizienten der Ankerspule in der Nulllage bei einer Periodenzahl von c = 425 zu bestimmen; man musste sich mit einem c = 150 begnügen. Bei dieser Periodenzahl ergab sich:

J_1	E_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L
11,3	2,12	12,2	23,9	0,510	0,860	0,000172
15,1	2,81	23,2	42,5	0,546	0,847	0,000173

Anker ausserhalb des Feldes:

Bei c = 50 ist L = 0,000165

„ c = 150 „ L = 0,000164

Anker im Feld:

Bei $c = 50$ ist $L = 0{,}000210$
„ $c = 150$ „ $L = 0{,}000173$

Bis jetzt haben wir L für den Fall bestimmt, dass das Feld offen ist. Beim Betriebe ist es aber an die Klemmen der Maschine angeschlossen. Da der Widerstand des Ankers im Verhältnis zu dem der Erregerspulen klein ist, so müssen die letzteren den oben erwähnten Kraftfluss durch die Magnete und durch das Joch noch mehr dämpfen. Um diesen Fall, der beim Betriebe eintritt, zu untersuchen, können wir die Erregung durch einen Widerstand, den wir allmählich auf Null herabsinken lassen, kurz schliessen, und erhalten dann folgende Werte:

J_1	E_1	W	$J_1 . E_1$	$\cos\varphi$	$\sin\varphi$	Nulllage der Spule		
						R	L	c
22,0	2,04	32,0	44,9	0,713	0,711	∞	0,000210	50
22,1	1,86	30,1	41,1	0,732	0,681	412	0,000182	50
22,0	1,84	29,6	40,5	0,731	0,682	118	0,000181	50
22,0	1,81	28,6	39,8	0,733	0,675	0	0,000178	50
12,1	2,33	16,1	28,3	0,569	0,823	0	0,000168	150

Wenn wir mit der Periodenzahl noch höher gehen könnten, so müsste L noch mehr sinken. Für $c = 425$ wird die dämpfende Wirkung des massiven Eisens und der Erregerwickelung so gross sein, dass der Kraftfluss durch das Feld verschwindend klein wird und somit L der Spule im Felde (Nulllage) den Wert von L derselben Spule, für den Fall, dass der Anker sich in der Luft befindet, annehmen muss. Unter Umständen wird vielleicht L der Spule im Felde noch kleiner, weil ein Teil des Kraftflusses, der teilweise ausserhalb des Ankers verläuft und die Pole trifft, auch noch etwas gedämpft wird. Die Schwächung wird aber nicht gross sein; denn erstens ist dieser Kraftfluss infolge des grossen Luftweges klein und zweitens ist der Weg durch das massive Eisen verhältnismässig kurz. Somit dürfen wir mit grosser Sicherheit den wichtigen Schluss ziehen, dass der Selbstinduktionskoeffizient L einer Ankerspule im neutralen Felde denselben Wert hat, wie wenn der Anker ausserhalb des Feldes, d. h. in Luft sich befinden würde.

Dieses Resultat ermöglicht es uns, den Selbstinduktionskoeffizienten und den gegenseitigen Induktionskoeffizienten mit grosser Ge-

nauigkeit voraus zu berechnen. Und durch diese Untersuchung ist nun die Frage, ob ein Teil des Kraftflusses, der von der kommutierenden Spule erzeugt wird, durch das Feld geht oder nicht, definitiv entschieden worden. Die Annahme von Arnold, dass das Feld den Selbstinduktionskoeffizienten einer Spule praktisch nicht beeinflusst. hat sich somit als richtig erwiesen, dagegen ist die Behauptung von Fischer-Hinnen, dass ein Teil des Kraftflusses einer kommutierenden Ankerspule, den er durch den Faktor K_1 berücksichtigt, durch das Feld geht, unrichtig [1]).

Bis jetzt haben wir den Selbstinduktionskoeffizienten einer Spule genau untersucht. In Wirklichkeit kommutiert aber nicht nur eine Spule allein, sondern mehrere, deren Zahl von der Anzahl und Breite der Bürsten abhängt. Diese kommutierenden Spulen beeinflussen sich mehr oder weniger gegenseitig, je nachdem ihre Seiten direkt nebeneinander liegen oder voneinander entfernt sind. Auch kommt noch in Betracht, ob die Kommutation für die Spulen gleichzeitig erfolgt oder nicht. Im ersteren Falle wird die Selbstinduktion der Spule erhöht, im letzteren dagegen findet bei verschiedener Variation des Stromes in den einzelnen Spulen eine gegenseitige Dämpfung statt. Bei der Geist-Maschine liegen die Spulenseiten der zwei kurzgeschlossenen Spulen in benachbarten Nuten. Schaltet man dieselben derart hintereinander, dass beim Hindurchschicken eines Wechselstromes die benachbarten Spulenseiten die gleiche Stromrichtung haben, so wird die gegenseitige Induktion der beiden Spulen auf die Selbstinduktion einer Spule verstärkend wirken. Den durch M vergrösserten Selbstinduktionskoeffizienten einer Spule wollen wir als den erhöhten Selbstinduktionskoeffizienten L_e bezeichnen. Im vorliegenden Falle wurde L_e in verschiedenen Stellungen des Feldes durch Strom-, Spannungs- und Wattmessung ermittelt und folgende Werte dafür gefunden:

J_1	E_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L_e	α
17,5	2,05	23,1	35,8	0,645	0,746	0,000278	0
17,5	2,03	23,1	35,5	0,652	0,759	0,000280	20
17,4	2,11	24,0	36,8	0,651	0,759	0,000283	40
17,6	2,16	24,4	38,0	0,640	0,768	0,000299	50

[1]) Siehe Fischer-Hinnen, Berechnung und Konstruktion elektrische Gleichstrommaschinen. IV. Aufl. S. 214.

J_1	E_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L_e	α
17,5	2,33	24,4	40,8	0,596	0,803	0,000341	60
17,4	2,98	26,1	51,8	0,502	0,865	0,000469	70
17,2	3,23	28,1	55,5	0,506	0,862	0,000513	75
17,0	3,43	28,1	58,4	0,481	0,876	0,000563	80
17,0	3,62	29,9	61,5	0,486	0,874	0,000591	85
16,95	3,70	30,7	62.7	0,490	0,872	0,000605	90
16,95	3,83	31,4	64,8	0,484	0,875	0,000613	95
16,9	3,83	31,4	64,5	0,485	0,875	0,000630	100
17,0	3,70	30,1	62,9	0,478	0,878	0,000605	110
16,9	3,25	26,8	55,0	0,487	0,873	0,000535	120
17,1	2,63	24,4	45,0	0,541	0,841	0,000412	130

In Fig. 20, Kurve I, sind diese Werte graphisch aufgezeichnet. Bis 30° bleibt L_e konstant, beginnt dann bald rasch zu steigen und erreicht bei ca. 100° den Maximalwert, um wieder zu fallen. Das Anwachsen von L_e, sobald die Spulen in die Nähe der Pole kommen, ist auf die Vergrösserung der magnetischen Leitfähigkeit zurückzuführen.

Der erhöhte Selbstinduktionskoeffizient L_e, der hier für $c = 50$ ermittelt wurde, setzt sich zusammen aus dem Selbstinduktionskoeffizienten der Spule vermehrt um den gegenseitigen Induktionskoeffizienten. Nach S. 395 ist:

$$M = \frac{w^2 l . 2}{10^8} . 0,92 \lg \left(\frac{r_2}{r_s}\right); \quad r_2 = \tau . \frac{p}{1 + p}.$$

Da $p = 1$ ist, wird

$$r_2 = \frac{\pi D}{4} = 96,7; \quad r_s = \frac{122,8 . \pi}{60} = 6,42,$$

$$M = \frac{1,84 . 64}{108} . 16,7 \lg \frac{96,7}{6,42} = \mathbf{0,0000355}.$$

Für die Nulllage ergibt sich:

$$L_e = 0,000210 + 0,0000355 = 0,000246.$$

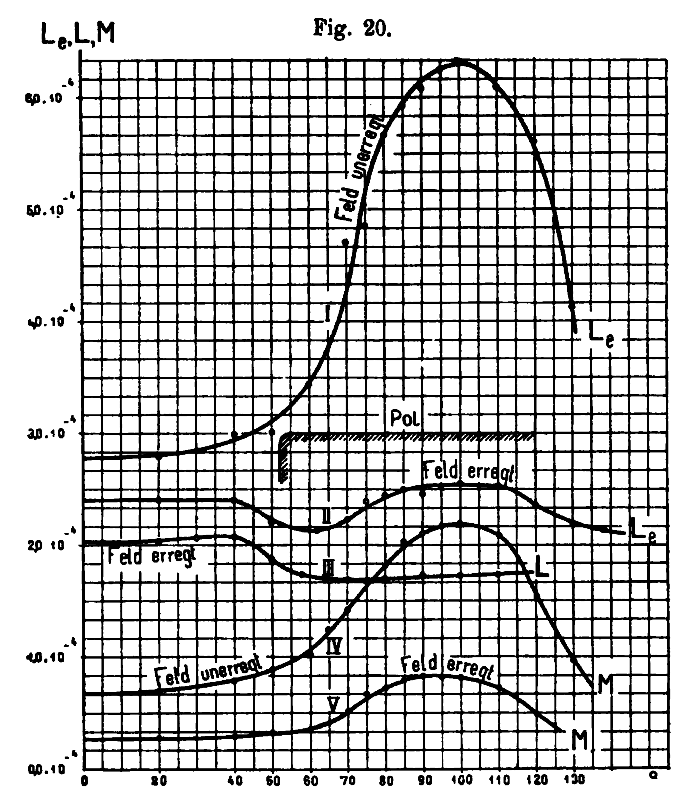
Hierzu kommt noch der Kraftfluss der zweiten Spule, der durch das Feld geht, und die erste auch umschlingt. Für $c = 50$ ist der Wert desselben

$$0,000210 - 0,000165 = 0,0000450.$$

Somit wird

$$L_e = 0,000291.$$

Fig. 20.



Dieser Wert stimmt mit dem experimentell ermittelten sehr gut überein.

Bei erregtem Feld erhalten wir für die verschiedenen Stellungen folgende Werte:

J_1	E_l	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L_e	α
17,4	1,66	18,0	28,9	0,621	0,783	0,000238	0
17,5	1,66	18,0	29,1	0,618	0,786	0,000238	20
17,4	1,66	18,0	28,9	0,621	0,783	0,000238	40
17,4	1,54	18,0	27,6	0,652	0,759	0,000220	50
17,5	1,58	18,8	27,6	0,680	0,733	0,000211	62
17,5	1,65	19,8	29,2	0,677	0,736	0,000223	70
17,5	1,75	20,4	30,6	0,664	0,748	0,000238	75
17,5	1,79	20,8	31,3	0,664	0,748	0,000242	80
17,5	1,82	21,0	31,9	0,658	0,753	0,000250	85
17,5	1,83	21,5	32,0	0,672	0,740	0,000246	90
17,5	1,87	21,9	32,8	0,559	0,743	0,000253	95

J_1	E_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L_e	α
17,5	1,87	21,5	32,6	0,659	0,752	0,000252	100
17,5	1,85	21,5	32,4	0,665	0,747	0,000252	110
17,5	1,78	21,5	31,2	0,689	0,724	0,000234	120
17,5	1,67	20,4	29,3	0,695	0,719	0,000218	130

Kurve II zeigt die graphische Darstellung dieser Werte. Wie ersichtlich bleibt L_e anfangs ziemlich konstant, fängt dann bei 40° an zu sinken, bis es bei ca. 58° den kleinsten Wert erreicht, und steigt dann bis etwa 85°, von wo ab es wieder ziemlich konstant ist. Diese eigenartige Einbuchtung der L_e-Kurve bei erregtem Feld kann, wie wir später sehen werden, mit Hilfe der Kurve der gegenseitigen Induktion bei erregtem Feld sehr einfach erklärt werden.

Um den gegenseitigen Induktionskoeffizienten M experimentell zu ermitteln, schicken wir in die eine Spule einen bekannten Wechselstrom J_1 und messen die in der anderen Spule induzierte Spannung E_2. Dann ist:

$$M = \frac{E_2}{2 . \pi . c . J_1} .$$

Für die verschiedenen Stellungen der Spule im Feld ergeben sich folgende Werte:

Bei unerregtem Felde				Bei erregtem Felde			
E_2	J_1	M	α	E_2	J_1	M	α
0,36	17,0	0,000068	0	0,152	18,0	0,000027	0
0,37	17,0	0,000070	20	0,156	18,0	0,000028	20
0,42	17,0	0,000079	40	0,168	18,0	0,000030	40
0,48	16,9	0,000090	50	0,179	18,0	0,000032	50
0,55	16,9	0,000104	60	0,185	18,0	0,000033	60
0,67	17,0	0,000124	65	0,29	17,8	0,000052	70
0,76	17,0	0,000142	70	0,38	17,8	0,000067	75
0,89	16,8	0,000167	75	0,41	17,7	0,000072	80
0,95	16,6	0,000182	80	0,45	17,6	0,000080	85
1,06	16,6	0,000203	85	0,46	17,6	0,000082	90
1,11	16,8	0,000210	90	0,46	17,6	0,000082	95
1,14	16,8	0,000217	95	0,47	17,6	0,000083	100
1,15	17,0	0,000218	100	0,44	17,6	0,000078	110
1,12	17,0	0,000209	110	0,29	17,8	0,000051	120
0,83	17,0	0,000155	120				
0,51	17,0	0,000096	130				

Wie aus Kurve IV ersichtlich ist, steigt resp. fällt M schnell, sobald sich die Spule dem Pole nähert resp. wieder von ihm entfernt. Das Maximum liegt zwischen 90 und 110°.

Ist das Feld erregt (Kurve V, Fig. 20), so erhalten wir infolge der Sättigung des Eisens, welches die magnetische Leitfähigkeit bedeutend vermindert, erheblich kleinere Werte von M. Der Verlauf der Kurve ist jedoch im wesentlichen wie bei IV.

Das Ansteigen dieser Kurve erfolgt erst bei 60°, während die L-Kurve bei erregtem Felde (III), die hier nochmals aufgezeichnet ist, schon von 40° an abnimmt. Somit muss die L_e-Kurve bei erregtem Felde (II), welche die Kombination dieser beiden Kurven ist, zuerst wie Kurve III abnehmen, und sobald M (V) zunimmt, wieder ansteigen.

Durch Berechnung von M erhält man:

$$M = \frac{w^2 l . 2}{10^8} . 0{,}92 . \lg\left(\frac{r_2}{r_s}\right); \quad r_2 = 96{,}7; \quad r_s = 6{,}42,$$

$$M = \frac{1{,}84 . 64}{10^8} . 16{,}7 . \lg \frac{96{,}7}{6{,}42} = 0{,}0000355.$$

Wenn man den Kraftfluss, der durch das Feld geht, noch hinzuaddiert, erhält man:

$$\mathbf{M = 0{,}0000805.}$$

II. Untersuchung der Induktionskoeffizienten an einem unbewickelten Anker.

Die Dimensionen dieses Ankers sind:

Durchmesser der Armatur	170 mm
Länge der Armatur	173 „
Anzahl der Nuten	45
Nutenteilung	11,9 mm
Breite der Nuten	5,3 „
Tiefe der Nut	23,0 „

Der Anker besitzt noch drei Bandageeinfraisungen von einer Tiefe von 1,5 mm und einer Breite von 20 mm.

Für alle nun folgenden Untersuchungen befindet sich der Anker, der für die verschiedenen Fälle besonders gewickelt wurde, ausserhalb des Feldes.

1. Abhängigkeit des Selbstinduktionskoeffizienten L von der Lage der Spulenseiten.

a) Eine Spulenseite pro Nut (siehe Fig. 21, Spule A). Die Windungszahl beträgt 32.

E_1	J_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L
4,07	4,42	13,50	18,0	0,730	0,684	0,00201
5,20	5,50	21,47	28,6	0,752	0,658	0,00198
6,01	6,31	28,52	37,9	0,752	0,658	0,00200
8,08	8,36	52,41	67,5	0,776	0,631	0,00194
12,97	12,17	127,88	158,1	0,810	0,589	0,00200

Im Mittel L = **0,00199.**

Die Berechnung ergibt folgenden Wert:

$$\lambda_n = 1{,}25\left(\frac{r}{3\,r_3} + \frac{r_4}{r_3}\right) = 1{,}25\left(\frac{19}{15{,}9} + \frac{4}{5{,}3}\right) = \mathbf{2{,}44},$$

$$\lambda_k = 0{,}92 \lg\left(\frac{\pi r_2}{r_1}\right);\; r_2 = \frac{\tau}{2} = \frac{D\pi}{4} = 134{,}0\,\text{mm};\; \lambda_k = 0{,}92\,.\,1{,}90 = \mathbf{1{,}75},$$

$$\lambda_s = 0{,}46\,.\lg\left(\frac{l_s}{d_s}\right) - 0{,}11;\quad l_s = 240\ \text{mm};\quad d_s = 15{,}6\ \text{mm},$$

$$\frac{l_s}{l}\,.\,\lambda_s = \frac{240}{173}\,[0{,}46\,.\,1{,}188 - 0{,}11] = \mathbf{1{,}39},$$

$$L = \frac{32^2\,.\,17{,}3}{10^8}\,2\,[2{,}44 + 1{,}75 + 1{,}39] = \frac{32^2\,.\,17{,}3}{10^8}\,.\,2\,.\,5{,}58 = \mathbf{0{,}00198}.$$

b) Eine Spulenseite füllt eine Nut nur halb aus (siehe Fig. 21, Spule B). Die Windungszahl dieser Spule ist 11.

E_1	J_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L
1,60	6,10	9,13	9,76	0,936	0,352	0,000295
2,62	9,98	22,36	23,5	0,950	0,312	0,000290
4,28	13,0	54,2	55,7	0,962	0,274	0,000287

Im Mittel L = **0,000291.**

Die Berechnung ergibt folgenden Wert:

$$\lambda_n = 1,25 \left(\frac{r}{3\,r_3} + \frac{r_4}{r_3}\right) = 1,25 \left(\frac{18}{15,9} + \frac{5}{5,3}\right) = \mathbf{2,68},$$

$$\lambda_k = 0,92 \lg \left(\frac{\pi\, r_2}{r_1}\right); \quad r_2 = 134 \text{ mm}; \quad \lambda_k = \mathbf{1,75},$$

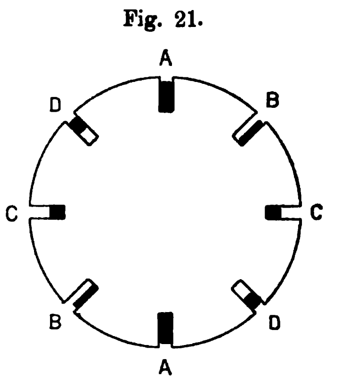
$$\lambda_s = 0,46 \lg \left(\frac{l_s}{d_s}\right) - 0,11; \quad l_s = 240 \text{ mm}; \quad d_s = 13,7 \text{ mm},$$

$$\frac{l_s}{l}\,\lambda_s = \frac{240}{173}\,[0,46 \,.\, 1,24 - 0,11] = \mathbf{1,43},$$

$$L = \frac{11^2 \,.\, 17,3}{10^8} \,.\, 2\,[2,68 + 1,75 + 1,43] = 5,86 = \mathbf{0,000246.}$$

Der berechnete und der experimentell ermittelte Wert stimmen hier nicht mehr so gut überein, wie im ersten Falle, wo die Spulenseite die Nut ganz erfüllte. Diese Abweichungen sind darauf zurückzuführen, dass die Kraftflussverteilung bei halbgefüllter Nut nicht dieselbe ist, wie wir sie der Rechnung zu Grunde gelegt haben; denn wenn wir wieder verschiedene Kraftlinienbilder aufzeichnen, so werden wir konstatieren, dass für diese halbgefüllte Nut das angenommene Kraftlinienbild nicht die grösste Leitfähigkeit besitzt; infolgedessen muss der berechnete Wert kleiner sein als der experimentell gefundene.

Fig. 21.



c) Eine Spulenseite füllt nur die untere Hälfte der Nut aus (siehe Fig. 21, Spule C). Die Windungszahl der Spule ist 15.

E_1	J_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L
2,42	6,35	13,08	15,35	0,853	0,527	0,000568
3,38	8,66	25,9	29,2	0,887	0,462	0,000573
4,80	11,22	48,9	53,8	0,907	0,420	0,000572
6,23	13,73	77,7	85,6	0,910	0,415	0,000575

Im Mittel **0,000572.**

Durch Berechnung erhält man:

$$\lambda_n = 1,25\left(\frac{r}{3\,r_3} + \frac{r_4}{r_3}\right) = 1,25\left(\frac{9}{15,9} + \frac{14}{5,3}\right) = \mathbf{4,02},$$

$$\lambda_k = 1,75; \quad \frac{l_s}{l}\,.\,\lambda_s = 1,51,$$

$$L = \frac{15^2\,.\,17,3}{10^8}\,.\,2\,.\,[4,02 + 1,75 + 1,51] = \frac{15^2\,.\,17,3}{10^8}\,.\,2\,.\,7,28 = \mathbf{0,000566.}$$

d) Eine Spulenseite füllt die obere Hälfte der Nut aus (siehe Fig. 21, Spule D). Die Spule besitzt 15 Windungen.

E_1	J_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L
2,29	6,4	13,5	14,65	0,922	0,391	0,000446
5,94	13,7	77,7	81,5	0,952	0,326	0,000451

Im Mittel **0,000449.**

Durch Rechnung erhalten wir:

$$\lambda_n = 1,25\left(\frac{r}{3\,r_3} + \frac{r_4}{r_3}\right) = 1,25\left(\frac{9}{15,9} + \frac{5}{5,3}\right) = \mathbf{1,91},$$

$$\lambda_k = \mathbf{1,75}; \quad \frac{l_s}{l}\,.\,\lambda_s = \mathbf{1,51},$$

$$L = \frac{15^2\,.\,17,3}{10^8}\,.\,2\,[1,91 + 1,75 + 1,51] = \frac{15^2\,.\,17,3}{10^8}\,.\,2\,.\,5,17 = \mathbf{0,000405.}$$

Hier sind die Abweichungen noch grösser.

2. Abhängigkeit des gegenseitigen Induktionskoeffizienten M von der Lage der Spulenseiten.

a) Die Spulenseiten der zwei Spulen liegen in derselben Nut nebeneinander (siehe Fig. 22, Spule I). Jede Spule besitzt 11 Windungen.

E_2	J_1	M
0,305	6,1	0,000160
0,459	8,98	0,000163
0,659	13,0	0,000162

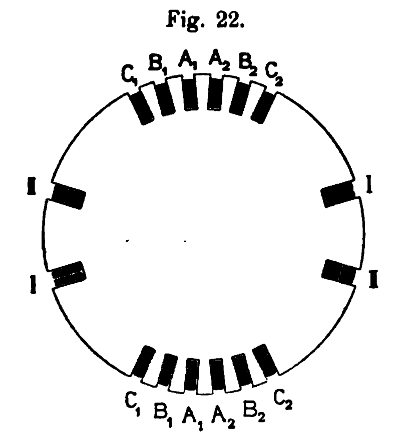
Im Mittel **0,000162.**

Durch Berechnung erhält man für M den Wert (siehe S. 394)

$$M = \frac{11^2 \,.\, 17{,}3}{10^8} \,.\, 2\,[2{,}68 + 1{,}75] = \frac{11^2 \,.\, 17{,}3}{10^8} \,.\, 2 \,.\, 4{,}34 = \mathbf{0{,}000186.}$$

Diese grosse Abweichung zwischen dem berechneten und experimentell gefundenen Werte rührt von der einseitigen Verteilung

Fig. 22.



der Amperewindungen in der Nut her, welche eine ganz andere Kraftflussverteilung hervorruft, besonders in den Ecken der Spule, als wenn die Nut vollständig ausgefüllt ist.

b) Die Spulenseiten der beiden Spulen liegen in derselben Nut übereinander, die Windungszahl der beiden Spulen ist 15 (siehe Fig. 22, Spule II).

α) Strom in die untere Spule geschickt, induzierte Spannung der oberen Spule gemessen.

E_2	J_1	M
0,612	5,60	0,000350
0,911	8,66	0,000355
1,240	11,22	0,000352

Im Mittel **0,000352.**

β) Strom in die obere Spule geschickt, induzierte Spannung der unteren Spule gemessen.

E_2	J_1	M
0,871	7,76	0,000352
1,014	9,15	0,000354
1,24	11,1	0,000356
1,48	13,7	0,000348

Im Mittel **0,000353.**

Die Berechnung ergibt für M folgenden Wert:

$$\lambda_m = \frac{1,25}{r_1}\left(\frac{r}{2} + r_4\right) + 0,92 \lg \left(\frac{\pi r_2}{r_1}\right); \; r_2 = 134,0 \text{ mm},$$

$$\lambda_m = \frac{1,25}{5,3}(4,5 + 5) + 1,75 = 2,24 + 1,75 = 3,99,$$

$$M = \frac{15^2 . 1,73}{10^8} . 2 . 3,99 = \mathbf{0,000312.}$$

Auch diese Abweichung ist auf eine nicht genaue Uebereinstimmung des angenommenen und des wirklichen Kraftflusses zurückzuführen.

c) Die Spulenseiten der zwei Spulen liegen in benachbarten Nuten (siehe Fig. 22, Spulen A_1 und A_2). Die Spulen haben 32 Windungen.

E_2	J_1	M
0,582	5,50	0,000339
0,666	6,31	0,000336
0,914	8,36	0,000348
1,34	12.17	0,000350

Im Mittel **0,000343.**

Durch die Rechnung erhält man:

$$\lambda_m = 0,92 . \lg \left(\frac{r_2}{r_s}\right); \quad r_2 = 134 \text{ mm}; \quad r_s = 11,9 \text{ mm}; \quad \lambda_m = 0,966,$$

$$M = \frac{32^2 . 17,3}{10^8} . 2 . 0,966 = \mathbf{0,000341.}$$

d) Zwischen den Spulenseiten der beiden Spulen liegt eine freie Nut (siehe Fig. 22, Spulen A_1 und B_2). Die Windungszahl der beiden Spulen ist je 32.

E_2	J_1	M
0,444	5,35	0,000272
0,732	8,66	0,000269
1,16	13,64	0,000270
0,903	10,58	0,000272

Im Mittel **0,000271.**

Die Rechnung ergibt folgenden Wert:

$$\lambda_m = 0{,}92 \, . \, \lg \left(\frac{134 - \frac{11{,}9}{2}}{2 \, . \, 11{,}9} \right) = 0{,}67,$$

$$M = \frac{32^2 \, . \, 17{,}3}{10^8} \, . \, 2 \, . \, 0{,}67 = \mathbf{0{,}000238.}$$

e) Zwischen den Spulenseiten der beiden Spulen liegen zwei freie Nuten (siehe Fig. 22, Spulen B_1 und B_2). Die Windungszahl der beiden Spulen ist je 32.

E_2	J_1	M
0,350	4,88	0,000229
0,458	6,53	0,000224
0,599	8,35	0,000229
0.765	10,48	0,000232
0,952	13,53	0,000224

Im Mittel **0,000228.**

Durch Rechnung erhält man:

$$\lambda_m = 0{,}92 \lg \left(\frac{134 - 11{,}9}{3 \, . \, 11{,}9} \right) = 0{,}49,$$

$$M = \frac{32^2 \, . \, 17{,}3}{10^8} \, . \, 2 \, . \, 0{,}49 = \mathbf{0{,}000173.}$$

f) Zwischen den Spulenseiten der beiden Spulen liegen drei freie Nuten (siehe Fig. 22, Spulen B_1 und C_2). Die Windungszahl der beiden Spulen ist je 32.

E_2	J_1	M
0,426	6,34	0,000182
0,488	8,40	0,000185
0,634	10,8	0,000187
0,770	13,24	0,000184

Im Mittel **0,0001845.**

Durch Berechnung erhält man:

$$\lambda_m = 0,92 \,.\, \lg\left(\frac{134 - \frac{3}{2} \,.\, 11,9}{4 \,.\, 11,9}\right) = 0,356,$$

$$M = \frac{32^2 \,.\, 17,3}{10^8} \,.\, 2 \,.\, 0,356 = \mathbf{0,000126.}$$

g) Zwischen den Spulenseiten der beiden Spulen liegen vier freie Nuten (siehe Fig. 22, Spulen C_1 und C_2). Die Windungszahl der beiden Spulen ist je 32.

E_2	J_1	M
0,472	9,19	0,000164
0,565	10,70	0,000168
0,680	12,8	0,000169

Im Mittel **0,000167.**

Durch Rechnung erhält man:

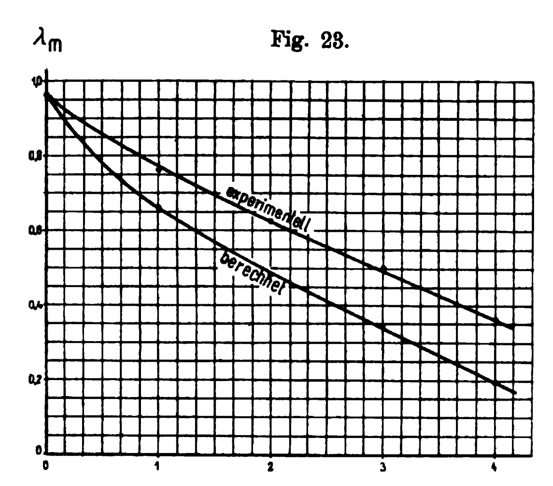
$$\lambda_m = 0,92 \,.\, \lg\left(\frac{134 - 2 \,.\, 11,9}{5 \,.\, 11,9}\right) = 0,246,$$

$$M = \frac{32^2 \,.\, 17,3}{10^8} \,.\, 2 \,.\, 0,246 = \mathbf{0,0000872.}$$

Wenn wir die Mittelwerte der experimentell befundenen Werte und die berechneten Werte von λ_m graphisch auftragen, so erhalten wir die Kurven von Fig. 23. Sie zeigen recht deutlich, dass je weiter

die Spulenseiten der zwei Spulen sich entfernen, um so mehr weichen die experimentell gefundenen Werte von den berechneten ab. Die Ursache hierfür liegt darin, dass die der Rechnung zu Grunde gelegte Kraftflussverteilung nicht ganz mit der wirklichen übereinstimmt. Offenbar ist der Kraftlinienweg in der Luft (Evolvente, Halbkreis, Evolvente) in Wirklichkeit etwas kleiner. Es wurde deshalb durch Annahme eines anderen Kraftlinienweges versucht, bessere Werte für M zu bekommen; dabei wurden aber, wenn eine Integration über-

Fig. 23.



haupt möglich war, die Endformeln so kompliziert, dass es wertlos erschien, dieselben hier anzugeben. Empfehlenswerter ist es daher, den berechneten Wert mit einem Korrektionsfaktor K zu multiplizieren. Derselbe ergibt sich aus diesen Versuchen wie folgt:

K = 1,15 für eine Nut zwischen den Spulenseiten
K = 1,30 „ zwei Nuten „ „ „
K = 1,45 „ drei „ „ „ „
K = 1,9 „ vier „ „ „ „

3. Abhängigkeit des scheinbaren Selbstinduktionskoeffizienten L_s von der Lage der Spulenseiten.

Eine Spule schliessen wir kurz, durch die andere schicken wir einen bekannten Wechselstrom.

Durch Strom-, Spannungs- und Wattmessung erhält man dann den scheinbaren Selbstinduktionskoeffizienten L_s.

a) Die Spulenseiten der zwei Spulen liegen in derselben Nut nebeneinander (siehe Fig. 22, Spule I). Die Windungszahl der beiden Spulen ist je 11.

E_1	J_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L_s
1,87	6,60	12,2	12,34	0,989	0,142	0,000128
2,77	9,16	25,0	25,3	0,989	0,142	0,000130

Im Mittel **0,000129.**

Durch Rechnung erhält man:

$$L_s = 0.$$

b) Die Spulenseiten der zwei Spulen liegen in derselben Nut übereinander (siehe Fig. 22, Spule II). Die Windungszahl der beiden Spulen ist je 15.

α) Die untere Spule ist kurzgeschlossen.

E_1	J_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L_s
2,46	6,37	14,83	15,65	0,948	0,330	0,000406
3,51	8,81	28,38	30,80	0,947	0,321	0,000407
5,77	12,8	71,5	74,0	0,965	0,262	0,000391
6,3	13,42	83,17	84,5	0,983	0,182	0,000396

Im Mittel **0,000400.**

Durch Rechnung erhält man:

$$L_s = L - \frac{M^2}{L} = 0{,}000449 - 0{,}000276 = \mathbf{0{,}000173.}$$

β) Die obere Spule ist kurzgeschlossen.

E_1	J_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L_s
2,83	6,61	17,5	18,7	0,936	0,356	0,000487
3,88	9,0	32,6	34,9	0,934	0,358	0,000491
5,23	11,33	56,0	59,4	0,942	0,337	0,000495

Im Mittel **0,000491.**

Die Rechnung ergibt:

$$L_s = L - \frac{M^2}{L} = 0{,}000571 - 0{,}000214 = \mathbf{0{,}000357.}$$

c) Die zwei Spulenseiten der zwei Spulen liegen in benachbarten Nuten (siehe Fig. 22, Spulen A_1 und A_2). Die Windungszahl der beiden Spulen beträgt je 32.

E_1	J_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L_s
4,42	4,85	16,17	21,4	0,755	0,656	0,00190
6,44	6,79	33,80	43,7	0,773	0,634	0,00192
12,53	11,96	122,54	150,0	0,817	0,576	0,00192

Im Mittel **0,00191.**

Durch Rechnung erhält man:

$$L_s = 0{,}00198 - 0{,}000058 = \mathbf{0{,}00192.}$$

d) Zwischen den zwei Spulenseiten liegt eine freie Nut (siehe Fig. 22, Spulen A_1 und A_2). Die Windungszahl der beiden Spulen ist je 32.

E_1	J_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L
8,34	8,56	55,07	71,8	0,780	0,630	0,00196
11,58	11,22	105,7	130,0	0,812	0,588	0,00193
14,88	13,85	174,0	206,0	0,824	0,566	0,00194

Im Mittel **0,00194.**

Durch Rechnung erhält man:

$$L_s = 0{,}00198 - 0{,}000037 = 0{,}00194.$$

e) Zwischen den Spulenseiten der zwei Spulen liegen zwei freie Nuten (siehe Fig. 22, Spulen B_1 und B_2). Die Windungszahl der beiden Spulen ist je 32.

E_1	J_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L_s
3,60	4,07	10,8	14,65	0,727	0,687	0,00195
6,84	7,33	38,26	50,15	0,764	0,660	0,00196
13,52	12,9	142,16	174,3	0,816	0,580	0,00196

Im Mittel **0,00196.**

Durch Rechnung erhält man:

$$L_s = 0{,}00198 - 0{,}000026 = 0{,}001954.$$



f) Zwischen den Spulenseiten der zwei Spulen liegen drei freie Nuten (siehe Fig. 22, Spulen C_1 und B_2). Die Windungszahl der beiden Spulen ist je 32.

E_1	J_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L_s
4,73	5,18	18,35	24,5	0,745	0,676	0,00197
6,58	7,21	35,4	47,5	0,745	0,676	0,00197
8,44	9,07	56,82	76,5	0,743	0,669	0,00198

Im Mittel **0,00197.**

g) Zwischen den Spulenseiten der zwei Spulen liegen vier freie Nuten (siehe Fig. 22, Spulen C_1 und C_2).

E_1	J_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L_s
8,24	8,66	54,2	71,3	0,760	0,652	0,00198
10,55	10,39	86,18	109,6	0,785	0,622	0,00200
11,12	10,58	96,0	118,0	0,813	0,588	0,00197

Im Mittel **0,00198.**

Von hier ab kann keine dämpfende Wirkung mehr konstatiert werden; L_s ist praktisch gleich L geworden.

Die Verkleinerung des Selbstinduktionskoeffizienten infolge der dämpfenden Wirkung der Kupferstäbe.

Bekanntlich induziert der Kraftfluss, der quer durch die Nut geht, in den Kupferstäben Wirbelströme, die ihrerseits wieder den Kraftfluss schwächen und so eine Verminderung des Selbstinduktionskoeffizienten zur Folge haben. Diese dämpfende Wirkung kann sehr schön nachgewiesen werden, wenn man zwischen die Drahtspule und die Nutenwände Messingbleche schiebt, wie dies in Fig. 24 veranschaulicht ist.

Fig. 24.

Zuerst wurde der Selbstinduktionskoeffizient der Spule ohne Messingbleche bestimmt. Es ergaben sich folgende Werte:

E_1	J_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L
6,0	6,29	27,8	37,7	0,738	0,775	0,000690
9,48	10,28	69,3	97,8	0,708	0,706	0,000692
12,32	13,0	117,0	160,0	0,729	0,684	0,000688

Im Mittel **0,000690.**

Bei eingeschobenen Messingblechen (Dicke 0,7 mm) erhielt man für dieselbe Spule folgende Werte von L:

E_1	J_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L
7,51	8,4	51,5	63,2	0,815	0,584	0,000553
9,17	10,2	76,0	93,4	0,814	0,580	0,000555
9,32	10,9	88,0	108,0	0,814	0,580	0,000558

Im Mittel **0,000555.**

Der bei den beiden Versuchsreihen verwendete Wechselstrom hatte eine Periodenzahl von $c = 150$.

Der Selbstinduktionskoeffizient der Spule sinkt also, wie wir sehen, infolge der dämpfenden Wirkung der Messingbleche von 0,000690 auf 0,000555 herab. Bei noch grösserer Periodenzahl und dickeren Messingblechen würde die Differenz noch bedeutender sein. Man ersieht hieraus, dass die Anwendung von hohen Kupferstäben ein sehr gutes Mittel ist, um den Selbstinduktionskoeffizienten der Ankerspulen herabzudrücken.

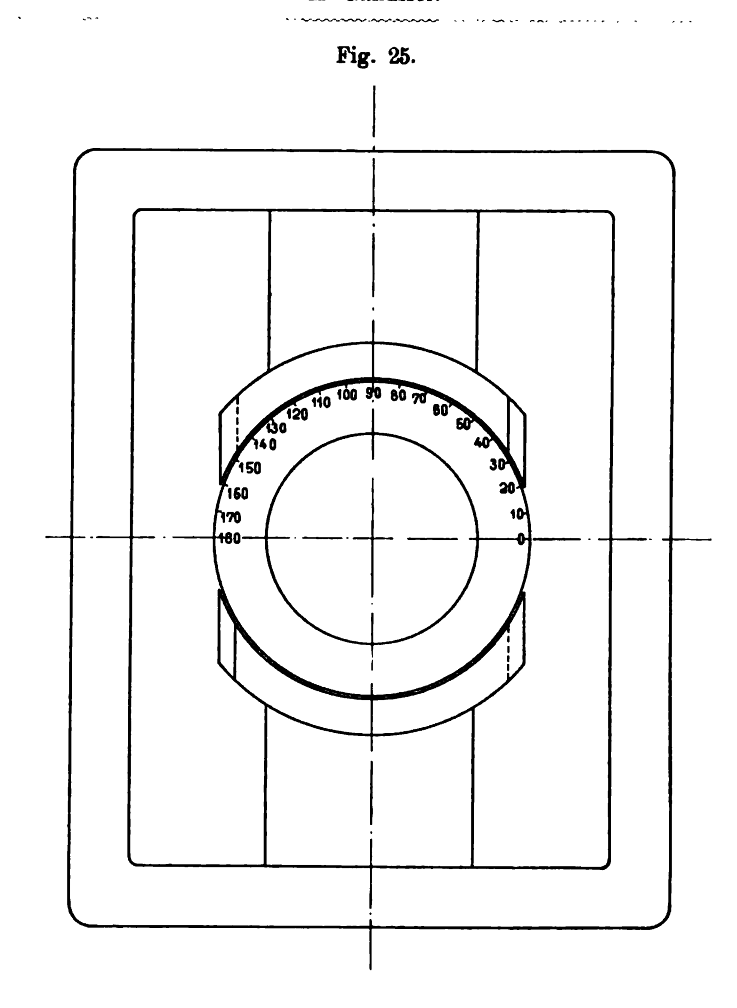
III. Untersuchungen an einer Maschine mit Ringanker der E.A.G. vorm. Schuckert & Co. Nürnberg.

In Fig. 25 ist diese Maschine dargestellt. Die Dimensionen derselben sind:

Aeusserer Durchmesser der Armatur . .	208 mm
Innerer Durchmesser der Armatur . . .	109 „
Armaturlänge	190 „

Von der Wickelung wurden zwei diametral gelegene Spulen (siehe Fig. 26, Spulen I und II) von der Wickelung losgelöst, und zunächst der Selbstinduktionskoeffizient für den Fall, dass der Anker ausserhalb des Feldes sich befinde, untersucht.

Fig. 25.



1. Der Anker ist ausserhalb des Feldes.

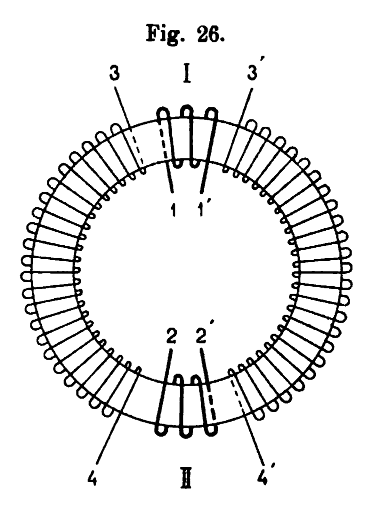
a) Der Selbstinduktionskoeffizient einer Spule, z. B. Spule I, wenn alle übrigen Enden (2, 2′, 3, 3′, 4 und 4′) unverbunden sind.

E_1	J_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L
2,46	8,8	15,8	21,7	0,730	0,682	0,000608
3,65	11,3	33,0	41,2	0,801	0,598	0,000614
5,18	14,3	62,7	74,1	0,847	0,532	0,000612

Im Mittel **0,000611.**

Wenn wir die Magnetisierungskurve des Ankereisens genau kennen würden, so könnten wir daraus diesen Wert von L ohne weiteres be-

Fig. 26.



rechnen; denn abgesehen von der Streuung in die Luft, die verhältnismässig klein ist, verläuft der gesamte Kraftfluss der Spule im lamellierten Ankereisen.

b) Die Spule II ist kurzgeschlossen.

E_1.	J_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L
1,54	29,5	43,0	45,5	0,945	0,327	0,0000514
1,88	35,0	62,6	65,8	0,951	0,310	0,0000502
2,15	39,0	80,8	84,0	0,952	0,306	0,0000509

Im Mittel **0,0000508.**

Durch Kurzschliessen der Spule II wird der von der Spule I erzeugte Kraftfluss sehr stark gedämpft, so dass der Selbstinduktionskoeffizient der Spule I auf den Wert 0,0000508, d. h. auf 8,4 % des unter a) gefundenen Wertes herabsinkt.

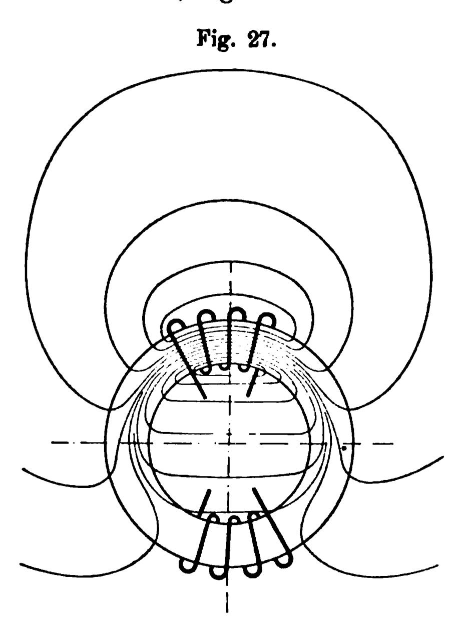
c) Durch beide Spulen wird ein Wechselstrom geschickt entsprechend dem gleichzeitigen Kommutieren derselben.

E_1	J_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L
0,65	31,0	17,2	20,2	0,852	0,524	0,0000372
0,78	36,8	24,5	28,6	0,858	0,514	0,0000367
0,84	39,8	28,5	33,1	0,862	0,508	0,0000368

Im Mittel **0,0000369.**

Die Kraftflüsse im Ankereisen, die von den beiden Spulen erzeugt werden, haben die entgegengesetzten Richtungen und heben sich, da die Ampèrewindungen der zwei Spulen gleich sind, daher in ihren Wirkungen auf. Die Selbstinduktion der Spulen rührt vom Kraftfluss her, der seinen Weg teilweise durch die Luft nimmt und nur einer Spule angehört. In Fig. 27 ist ein solches Kraftlinienbild einer Spule skizziert, über welches sich noch ein gleiches, aber umgekehrtes, von der anderen Spule herrührend, lagern würde.

Fig. 27.



Nun sind aber in Wirklichkeit die Enden 3 und 3′, 4 und 4′ durch die Bürsten direkt miteinander verbunden. Und wenn wir hier diese Verbindung auch herstellen, so finden wir, dass der Wert von L praktisch gleich Null ist; dies war vorauszusehen; denn durch die Wickelung 3, 4, 4′, 3′ wird nicht allein der Kraftfluss, der nur im Ankereisen verläuft, sondern auch derjenige, der in die Luft austritt, infolge der grossen Windungszahl der Wickelung fast ganz gedämpft.

2. Der Anker ist im Feld.

Hier untersuchen wir nur den Selbstinduktionskoeffizienten entsprechend dem Falle c). Indem wir den Anker drehen, erhalten wir für die verschiedenen Lagen der Spule gegenüber dem Felde (Fig. 25) folgende Werte.

a) Feld unerregt.

E_1	J_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L	α
0,85	36,5	24,7	30,8	0,800	0,600	0,0000470	0
0,85	36,3	24,7	30,7	0,804	0,595	0,0000469	10
0,87	36,2	25,5	31,3	0,814	0,581	0,0000470	20
0,95	36,2	27,0	34,4	0,785	0,619	0,0000550	30
1,04	36,1	28,2	37,4	0'754	0,657	0,0000631	40
1,10	36,1	29,8	39,6	0,753	0,658	0,0000676	50
1,14	36,1	30,8	41,2	0,747	0,665	0,0000711	60
1,17	36,0	31,6	42,1	0,747	0,665	0,0000732	70
1,18	36,0	31,8	42,5	0,747	0,665	0,0000738	80
1,18	36,0	31,8	42,5	0,737	0,665	0,0000738	90

b) Feld erregt.

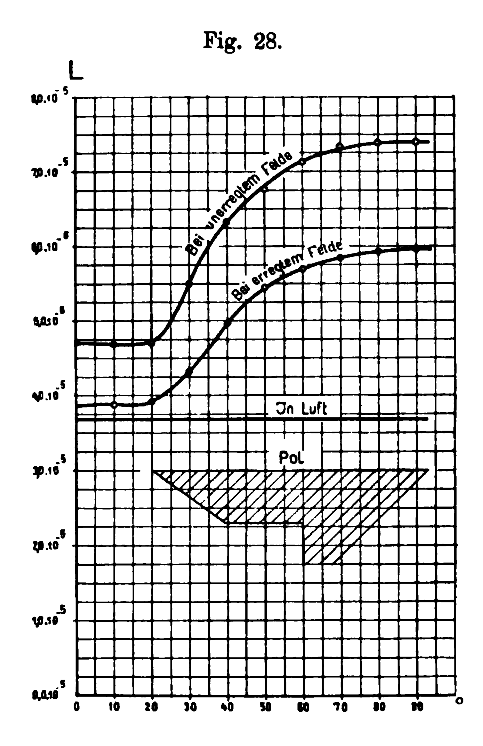
E_1	J_1	W	$J_1 . E_1$	cos φ	sin φ	L	α
0,78	37,0	24,3	28,9	0,841	0,540	0,0000386	0
0,80	37,0	24,9	29,4	0,847	0,532	0,0000388	10
0,81	37,0	24,9	30,0	0,830	0,558	0,0000390	20
0,87	36,8	26,8	31,9	0,841	0,541	0,0000431	30
0,94	36,9	28,2	34,6	0,815	0,579	0,0000497	40
0,98	37,1	28,9	36,4	0,795	0,607	0,0000545	50
1,01	37,0	29,9	37,4	0,797	0,602	0,0000569	60
1,03	36,9	30,0	38,1	0,787	0,617	0,0000584	70
1,06	36,8	30,4	38,9	0,781	0,625	0,0000593	80
1,05	36,9	30,6	38,8	0,788	0,616	0,0000595	90

Wie man aus den Tabellen ersieht, ist hier der Wert von L einer Spule in der Nulllage erheblich grösser als wenn der Anker sich ausserhalb des Feldes befindet. Der Grund hierfür liegt darin, dass ein Teil des Kraftflusses der Spule durch das Feld geht. Ist die Maschine erregt, so nimmt er ab. Im übrigen hat das auf S. 406 Gesagte ohne weiteres auch hier Gültigkeit.

In Fig. 28 sind die Werte von L bei erregtem und unerregtem Felde graphisch aufgetragen. Bis ca. 20° bleibt L konstant, wächst dann der grösseren magnetischen Leitfähigkeit wegen sehr rasch zu seinem Maximalwert bei 90° an. Einen ähnlichen Verlauf erhalten

wir, wenn das Feld erregt ist. Beim Trommelanker war der Verlauf bei erregtem Felde ein ganz anderer (S. 405). Dort war offenbar die Vergrösserung des magnetischen Widerstandes durch die Sättigung der Zähne im Verhältnis zur Verkleinerung des magnetischen Widerstandes durch die Pole überwiegend, so dass L in der Nähe derselben abnehmen musste, während beim Ringanker die Erhöhung des magnetischen Widerstandes durch die Sättigung der Zähne wegfällt,

Fig. 28.



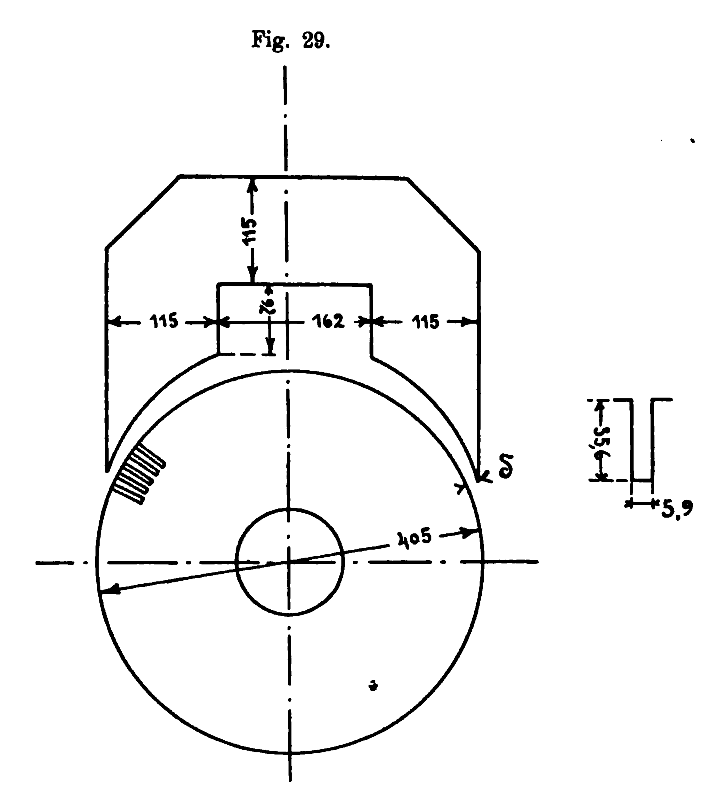
und somit L unter den Polen grösser sein muss, als in der neutralen Zone.

Bei der Ringwickelung ist die Dämpfung der kurzgeschlossenen Spulen durch die übrige Wickelung so stark (siehe S. 426), dass L, M und L_s praktisch gleich Null werden und deshalb für die Kommutation nicht in Betracht kommen wie bei der Trommelwickelung, wo diese dämpfende Wirkung der übrigen Ankerwickelung nicht vorhanden ist. Aus diesem Grunde wurden beim Ringanker keine weiteren Untersuchungen über die Werte von L, M und L_s angestellt.

IV. Untersuchungen von Parshall und Hobart.

In ihrem Buche „Electric Generator“ S. 160 u. f. haben Parshall und Hobart Versuche über Selbstinduktionskoeffizienten von

Fig. 29.



Ankerspulen angegeben. Eine der untersuchten Maschinen war ein 25 HP. Tramwaymotor mit folgenden Nutendimensionen:

$r_1 = r_3$	5,6 mm
r	27,5 „
r_5	6,0 „
τ	320,0 „
p	2
r_2	213,0 „
l	210,0 „
l_s	385,0 „
d_s	20,0 „

Experimentell ergab sich für:

$$\lambda = 6,63.$$

Aus den oben angegebenen Dimensionen folgt für:

$$\lambda = \lambda_n + \lambda_k + \frac{l_s}{l} \lambda_s = 6{,}23.$$

Parshall und Hobart führten noch Messungen aus, indem sie zwei, drei und vier Spulen à vier Windungen in Serie schalteten und jedesmal die magnetische Leitfähigkeit λ oder den Kraftfluss pro Ampèrewindung und 1 cm Armaturlänge bestimmten. Zuerst befand sich der Anker in Luft, nachher wurden dieselben Versuche noch für verschiedene Luftzwischenräume durchgeführt, die durch ein besonders lamelliertes Polstück eingestellt werden konnten (siehe Fig. 29). Da die Bohrung des Polstückes und der Ankerdurchmesser gleich gross sind, so wird beim Entfernen des ersteren vom Anker der Luftzwischenraum über den ganzen Polbogen nicht derselbe bleiben, sondern von den äusseren Spitzen nach innen zunehmen. In den nachfolgenden Tabellen und Kurven bedeutet der Luftzwischenraum δ den Abstand der äussersten Polspitze von der Armatur (siehe Fig. 29).

1. Eine Spule von 4 Windungen. Widerstand = 0,014 Ohm. J_m = Impedanz.

J	E	J_m	$2\pi c L$	c	L	λ	δ
23,0	1,07	0,0466	0,0444	97	0,0000728	11,1	∞
22,0	1,268	0,0576	0,0558	99	0,0000897	13,7	9,1
22,5	1,56	0,0694	0,0679	99	0,000109	16,8	4,4
20,0	1,725	0,0863	0,0852	99	0,000137	21,2	2,4
20,0	2,29	0,1145	0,1137	99	0,000183	28,0	1,2

2. Zwei Spulen von 4 Windungen in Serie. Widerstand = 0,033 Ohm.

J	E	J_m	$2\pi c L$	c	L	λ	δ
21,0	2,64	0,1256	0,1212	99	0,000195	7,5	∞
17,0	2,85	0,1676	0,1645	100	0,000262	10,0	9,1
16,5	3,55	0,215	0,212	100	0,000338	13,0	4,4
10,0	2,77	0,277	0,275	100	0,000438	16,8	2,4
9,0	3,20	0,356	0,355	99	0,000572	21,8	1,2

3. Drei Spulen von 4 Windungen in Serie.
Widerstand = 0,0473 Ohm.

J	E	J_m	$2\pi c L$	c	L	λ	δ
12,0	2,96	0,246	0,241	99	0,000388	6,6	∞
9,0	2,98	0,331	0,328	98	0,000533	9,0	9,1
14,0	6,3	0,450	0,447	98	0,000726	12,4	4,4
12,0	7,08	0,590	0,558	98	0,000958	15,9	2,4
16,0	12,5	0,782	0,781	98	0,001270	21,8	1,8

4. Vier Spulen von 4 Windungen in Serie.
Widerstand = 0,0637 Ohm.

J	E	J_m	$2\pi c L$	c	L	λ	δ
17,0	6,47	0,380	0,375	100	0,000598	5,8	∞
13,0	7,06	0,543	0,538	100	0,000871	8,2	9,1
9,0	6,64	0,738	0,735	100	0,00117	10,0	4,4
15,0	16,25	1,082	1,079	100	0,00172	16,6	2,4
15,5	21,3	1,375	1,374	100	0,00219	21,2	1,2

Die Werte λ dieser Tabelle sind in Fig. 30 graphisch dargestellt. Aus den Kurven geht recht deutlich hervor, wie die magnetische Leitfähigkeit einer Spule kleiner wird, wenn die Seiten derselben sich statt auf eine auf mehrere Nuten verteilen, und zwar ist diese Abnahme um so grösser, je grösser die magnetische Leitfähigkeit ist. Die oberen Kurven fallen daselbst rascher ab als die unterste. Diese Abnahme von L haben wir auch schon früher bei der Berechnung des Selbstinduktionskoeffizienten solcher Spulen konstatiert (siehe S. 393).

Eine weitere Maschine, die Parshall und Hobart untersuchten, war ein 20 HP. Motor (siehe Fig. 31), charakterisiert durch eine sehr kleine Nutenzahl (29). Die Dimensionen desselben sind:

Ankerdurchmesser	280,0 mm
Ankerlänge	230,0 „
Nutenzahl	29
Nutenteilung	30,3 „
Spulenzahl (à 6 Windungen, d. h. 6 Spulenseiten pro Nut)	87

Fig. 30.

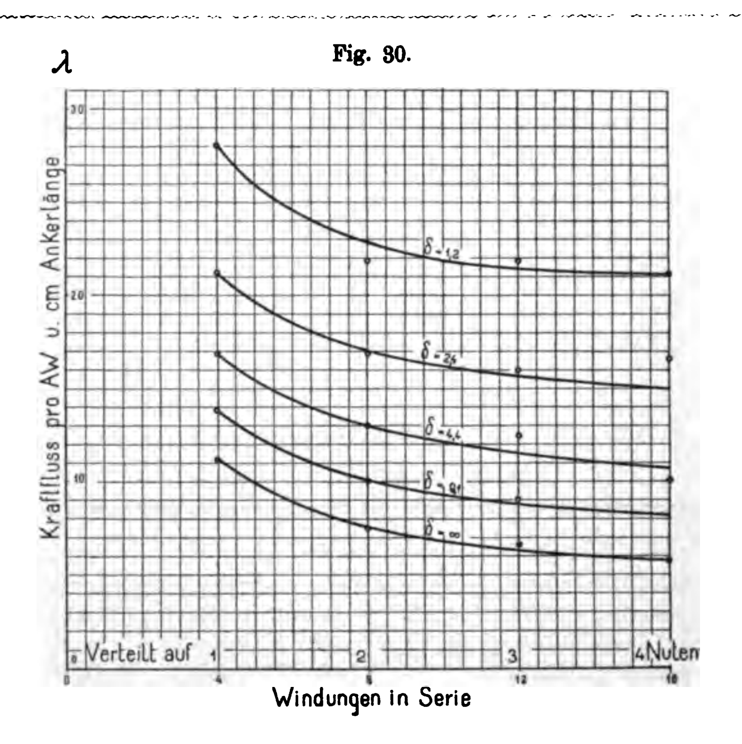
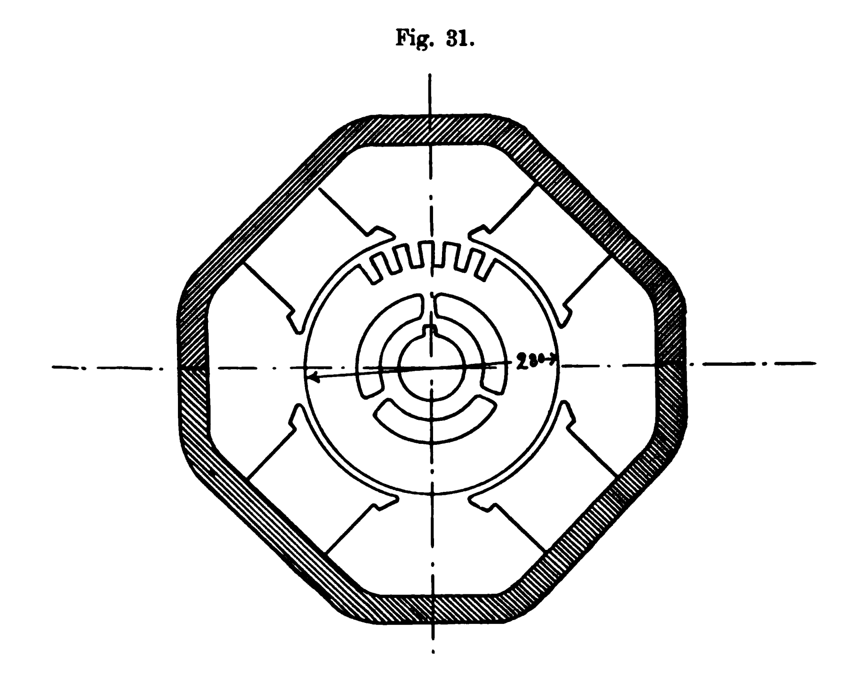
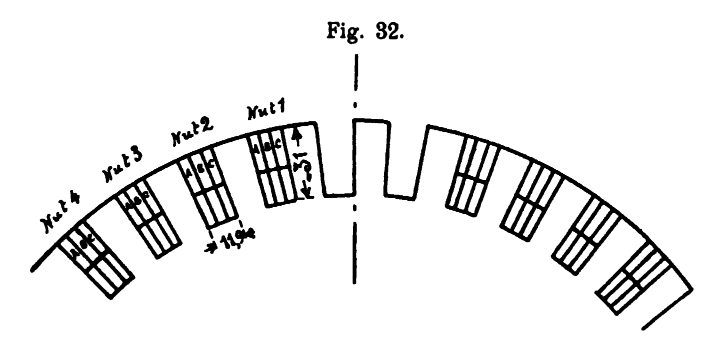

λ
Kraftfluss pro AW u. cm Ankerlänge
30
20
10
δ = 1,2
δ = 4,4
δ = ∞
Verteilt auf 1 2 3 4 Nuten
0
4
8
12
16
Windungen in Serie

Fig. 31.



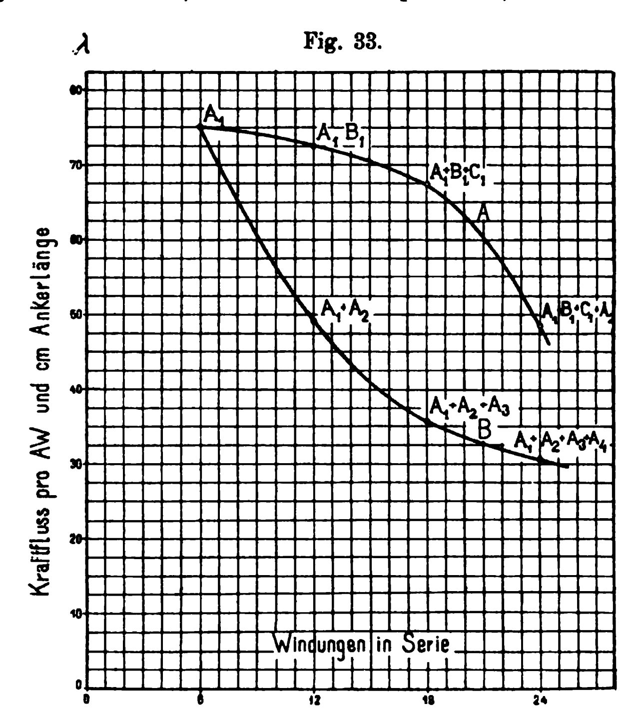
Die in der folgenden Tabelle angegebenen Werte von λ beziehen sich auf die Nulllage der Spule im Feld. In Fig. 32 ist die

Fig. 32.



Anordnung der Spulen in den Nuten angegeben. Durch Versuche ist festgestellt worden, dass die drei Spulen A, B und C praktisch

Fig. 33.



denselben Selbstinduktionskoeffizienten L haben. Nun wurde λ in Abhängigkeit von der Windungszahl untersucht und zwar:

1. Wenn die Windungen möglichst nahe beisammen sind.

Zuerst bestimmte man λ der Spule A, dann wurde Spule B und

Spule C derselben Nut, schliesslich noch Spule A der benachbarten Nut in Serie geschaltet und jedesmal λ bestimmt (siehe Tabelle I). Diese Werte sind in Fig. 33 graphisch aufgetragen (Kurve A).

2. Wenn die Windungen auf mehrere Nuten verteilt sind.

Es wurden nach und nach die Spulen A der Nuten 1, 2, 3 und 4 hintereinander geschaltet und jedesmal λ ermittelt. Diese Werte sind in Tabelle II zusammengestellt und in Fig. 33 graphisch aufgetragen (Kurve B). Aus diesen Kurven folgt, dass die Spulen, deren Windungen möglichst nahe beisammen sind, einen grösseren Selbstinduktionskoeffizienten besitzen, als wenn dieselben auf mehrere Nuten verteilt sind.

Tabellen zu den Versuchen von Parshall und Hobart.

Anordnung der Spulen in der Nut	Kraftfluss pro AW. und cm Ankerlänge	
	berechnet	durch Versuch
Tabelle I.		
Nut 1, Spule B	5,9	7,5
Nut 1, Spule AB	5,9	7,25
Nut 1, Spulen ABC	5,9	6,75
Nut 1, Spulen ABC „ 2, Spule B	3,9	4,85
Tabelle II.		
Nut 1, Spule B	5,9	7,5
Nut 1, Spule B „ 2, „ B	4,05	4,9
Nut 1, Spule B „ 2, „ B „ 3, „ B	2,6	3,55
Nut 1, Spule B „ 2, „ B „ 3, „ B „ 4, „ B	2,1	3,1

Der Uebergangswiderstand von Kohlenbürsten.

Von

Max Kahn.

Mit 5 Abbildungen und 24 in den Text gedruckten Tafeln.

Die vorliegende Arbeit hat den Zweck, einige Anhaltspunkte zu geben über das Verhalten des Uebergangswiderstands zwischen Kohlenbürsten und Stromabgebern. Es sollen die Bedingungen, die seine Grösse beeinflussen, und die Art seiner Abhängigkeit von ihnen näher untersucht werden.

Unter Uebergangswiderstand versteht man das Verhältnis des Spannungsabfalls an der Kontaktstelle zur übertragenen Stromstärke. Der spezifische Uebergangswiderstand ist der Widerstand eines Quadratcentimeters der Uebergangsstelle. Im folgenden soll nur von letzterem die Rede sein; der Einfachheit des Ausdrucks halber sei daher dieser als Uebergangswiderstand oder auch manchmal kurz als Widerstand bezeichnet.

Der Uebergangswiderstand wird von einer grossen Anzahl von Faktoren bestimmt, und seine Grösse variiert innerhalb sehr weiter Grenzen. Vor allem haben wir hier die merkwürdige Erscheinung, dass die Stromdichte an der Uebergangsstelle, d. h. die pro Quadratcentimeter Kontaktfläche übertragene Stromstärke, einen grossen Einfluss ausübt und der Widerstand in sehr starkem Masse von ihr abhängt. Ferner ist derselbe bedingt durch den Auflagedruck der Bürsten, durch die Konstruktion, das Gewicht und die Federung der Bürstenhalter, durch die Art des Stromabgebers (ob Ring oder Kollektor), sein Material, seine Oberflächenbeschaffenheit und Umfangsgeschwindigkeit, durch die Vibrationen der Maschine, das Unrundlaufen des Stromabgebers u. a. m. Endlich hat auch die Beschaffenheit des Materials der Bürste wesentlichen Einfluss, und es ergeben sich bei verschiedenen Kohlensorten Unterschiede, welche in der vorliegenden Arbeit hauptsächlich Gegenstand der Untersuchung sein sollen.

I. Litteratur.

Die ersten Berichte über eine Untersuchung des Uebergangswiderstandes finden wir in der Litteratur im Jahre 1895. E. V. Cox und H. W. Buck hatten im Laboratorium des Columbia College in New York Messungen angestellt und diese in „The Electrical Engineer“ Bd. XX S. 125 veröffentlicht (The relations between pressure, electrical resistance and friction in brush contact.). Der elektrische Teil dieser Untersuchungen hat jedoch nur den Wert, die Art der Abhängigkeit des Widerstands vom Druck gezeigt zu haben. Thatsächliche Zahlenwerte lassen sich aus den Angaben nicht entnehmen, da die Variation des Widerstandes mit der Stromdichte nicht berücksichtigt und die Stromdichte, bei der die Versuche vorgenommen sind, nicht genannt ist. Die gleichzeitig angestellten Reibungsuntersuchungen scheinen jedoch gute Resultate ergeben zu haben. Sie zeigen, dass der Reibungskoeffizient vom Auflagedruck unabhängig ist und mit wachsender Geschwindigkeit abnimmt.

In Deutschland hat zuerst Prof. E. Arnold Versuche auf dem betrachteten Gebiete veröffentlicht (Der Kontaktwiderstand von Kohlen- und Kupferbürsten und die Temperaturerhöhung eines Kollektors. E.-T. Z. 1899, S. 5). Hier werden erstmals die sämtlichen Faktoren, die den Uebergangswiderstand beeinflussen, angegeben und namentlich seine Abhängigkeit von der Stromdichte nachgewiesen, die hauptsächlich die Variation des Widerstands bedingt. Dieser sinkt nämlich bei steigender Stromdichte stetig in sehr starkem Masse ab. Von geringerem Einfluss sind Auflagedruck und Umfangsgeschwindigkeit. Mit wachsender Geschwindigkeit nimmt der Widerstand erst zu und dann wieder ab, was mit Schwingungen der Bürsten erklärt wird. Bei Kohlenbürsten verschwindet diese Abhängigkeit bei höheren Stromdichten mehr und mehr. Ferner ergibt sich, dass der Uebergangswiderstand bei poliertem und geöltem Kollektor erheblich grösser ist, als bei durch längeren Betrieb geschwärztem.

Der Vollständigkeit halber seien hier auch die Versuche von C. Pierron erwähnt, der kurz nach Prof. E. Arnold im „Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse, Janvier 1899“ drei Versuchsreihen veröffentlicht. Er betrachtet allein die Abhängigkeit des Uebergangswiderstandes von der Umfangsgeschwindigkeit und findet ähnliche Kurven wie Prof. Arnold. Der Uebergangswiderstand ergibt sich bei Kollektoren grösser als bei Schleifringen und auf durch zwei-

stündigen Betrieb erwärmten Ringen kleiner als kurz nach der Inbetriebsetzung.

Die an erster Stelle erwähnten Versuche im Laboratorium der Columbia-Universität wurden von den Herren R. B. Tiballs, S. Löwenberg und W. G. Burns im Jahre 1899 fortgesetzt (The electrical and mechanical resistance of dynamo brushes. The El. World and Eng. 16. Sept. 1899). Die Untersuchungen beschäftigen sich mit der Abhängigkeit des Uebergangswiderstands und der Reibung von Stromdichte und Auflagedruck und berücksichtigen namentlich auch den Einfluss des Oelens des Kollektors. Die Resultate sind in einer Reihe von Sätzen zusammengefasst.

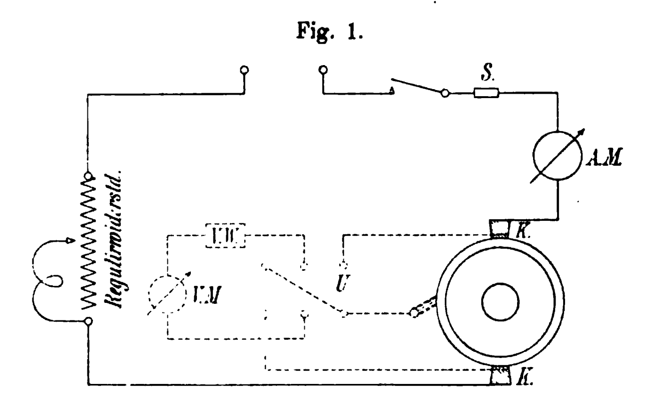
In letzter Zeit hat Ingenieur G. Dettmar ausgedehnte Versuche an Schleifringen und Kollektoren angestellt (Die günstigste Dimensionierung der Stromabnehmer bei Schleifringen und Kollektoren. E.-T. Z. 1900, S. 429). Er findet ähnliche Ergebnisse wie Professor Arnold; auf eine Abweichung in den Resultaten wird später genauer eingegangen werden. Die Versuchsergebnisse werden zu ausführlichen Untersuchungen über die günstigste Dimensionierung der Bürsten benutzt.

II. Der Uebergangswiderstand verschiedener Kohlensorten.

Untersuchungsmethode. Da es sich bei der vorliegenden Untersuchung um Messungen mit verschiedenen Kohlensorten und Vergleichung der gewonnenen Ergebnisse handelt, war es notwendig, die verschiedenen Versuche unter möglichst gleichen Bedingungen anzustellen, und für alle Sorten eine möglichst gleiche und genaue Untersuchungsmethode in Anwendung zu bringen. Die Messungen wurden daher an Schleifringen ausgeführt, da hier genauere Versuchsergebnisse gewonnen werden und Störungen eher vermieden werden können als bei Kollektoren. Der Ring wurde stets in möglichst blankem Zustande gehalten; bei Oxydation oder Schwärzung hätten sich graduelle Verschiedenheiten nicht leicht erkennen und berücksichtigen lassen. Aus demselben Grunde wurde vom Aufgeben von Oel abgesehen. Ein Hauptaugenmerk wurde auf eine gute Auflagefläche der Kohle gerichtet, und jede bei den Versuchen benutzte Sorte erst mit feiner Schmirgelleinwand möglichst genau eingeschliffen und dann durch längeres Einlaufen vollständig dem Ring angepasst. Der Vergleich erstreckte sich im übrigen hauptsächlich auf mittlere Verhältnisse und die in der Praxis üblichen Beanspruchungen.

Die Untersuchungsmethode war zum Teil durch die früheren Versuche von Arnold und Dettmar gegeben, jedoch sah ich mich veranlasst, eine Aenderung vorzunehmen. Bei diesen waren als Zu- und Ableitung zwei Bürsten auf einen Kollektor oder Ring aufgesetzt und der Widerstand der beiden hintereinandergeschalteten Kontakte durch Strom- und Spannungsmessung zwischen den beiden Kohlen festgestellt worden. Diese Methode bietet, abgesehen davon, dass es beinahe unmöglich ist, die beiden Kohlen gleichmässig, namentlich mit gleichem Auflagedruck aufzusetzen, Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Widerstandsänderung mit dem Auflagedruck. Man müsste immer den Druck beider Kohlen gleichmässig variieren, was ausserordentlich zeitraubend wäre und leicht zu Fehlern Veranlassung geben könnte. Ich zog es daher vor, immer nur den Widerstand eines Kontakts zu messen,

Fig. 1.



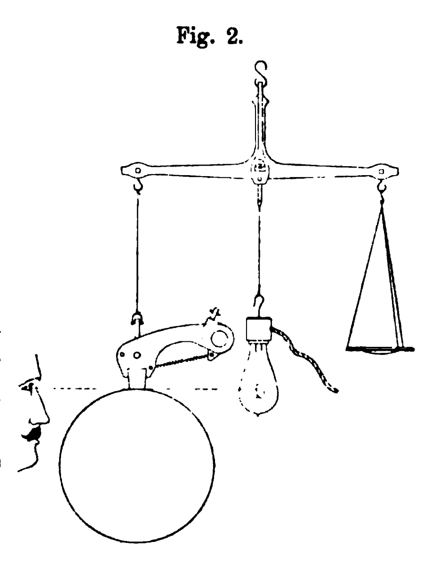
indem ich jeweils den Spannungsabfall zwischen Kohle und Ring feststellte. Der eine Voltmeterdraht wurde unten an der Kohle möglichst nahe der Kontaktfläche befestigt, der andere zu einer Hilfsbürste geführt (siehe Schaltungsschema Fig. 1).

So konnte die Spannungsdifferenz sowohl zwischen beiden Kohlen als auch zwischen dem Ring und jeder von ihnen gemessen werden. Volt- und Ampèremeter wurden geeicht und die Eichung gelegentlich wiederholt.

Zur Bestimmung des durch Federdruck und Eigengewicht von Kohle und Halter erzeugten Auflagedrucks wurde, nachdem Versuche mit Federn ein unbefriedigendes Resultat ergeben hatten, die durch die Skizze Fig. 2 veranschaulichte Methode gewählt. Die Kohlen wurden jeweils an der obersten und untersten Stelle des Rings aufgesetzt, und der Auflagedruck mittels eines Wagebalkens, an dessen

Aufhängung eine Glühlampe befestigt war, ausgewogen. Es wurden auf die Wagschale jeweils so viel Gewichte aufgelegt, bis sich die Kohle vom Ring abhob. Unter dieser erschien dann ein feiner Lichtstreif der Glühlampe, welcher vom Ring widergespiegelt wurde. Auf diese Art konnte man den Auflagedruck auch bei rotierendem Ring bestimmen. Die so gefundene Pressung wäre jedoch noch zu gross, da beim Abheben nicht nur Federdruck und Eigengewicht, sondern auch die Reibung des Halters überwunden werden muss. Man kann daher nach dem Abheben eine Anzahl Gewichte von der Wagschale abnehmen, ohne dass sich die Bürste wieder aufsetzt. Nimmt man so viel weg, als die Reibung beträgt, so ist zwar der Federdruck gerade ausgewichtet; die Reibung wird jedoch auch jetzt noch ein Aufsitzen der Kohle verhindern, und erst, wenn man noch einmal einen der Reibung entsprechenden Betrag weggenommen hat, wird die Halterfeder die Kohle wieder aufdrücken und der durchschimmernde Lichtstreif verschwinden. Man findet also den richtigen Auflagedruck, wenn man das Mittel nimmt aus dem Gewicht, das gerade das Abheben bewirkt, und dem, bei welchem die Kohle wieder aufsitzt. Bei ruhendem Ring ergab sich die Reibung des Halters auf die Kohlenmittellinie bezogen zu 30 bis 40 g; der Auflagedruck betrug im Mittel 300 bis 400 g, so dass eine Berücksichtigung dieses Umstands bei Bestimmung des Auflagedrucks wohl angebracht erscheint. Bei Lauf war der Einfluss der Reibung erheblich kleiner, namentlich bei höheren Tourenzahlen. Die Druckmessungen wurden daher stets auch bei rotierendem Ring ausgeführt.

Fig. 2.

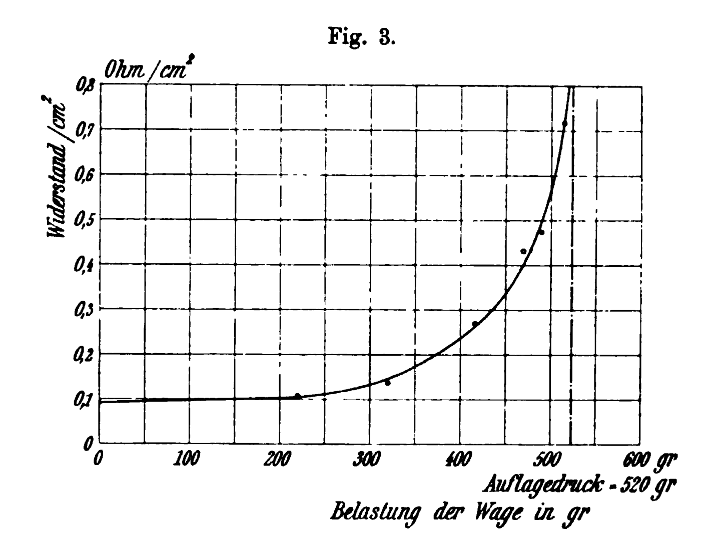


Zur Bestimmung des Auflagedrucks der an der untersten Stelle des Rings befindlichen Kohle wurde der Bürstenhalter um 180 Grad gedreht, so dass sie an den oberen Scheitelpunkt kam, und der Auflagedruck hier bestimmt. Der so gefundene Wert setzt sich zusammen aus der durch den Federdruck und der durch das Gewicht von Kohle und Halter verursachten Pressung. Der Anteil des Eigengewichts wurde nun bei gelöster Feder für sich ausgewogen und doppelt abgezogen,

da er ja an der untersten Ringstelle genau in entgegengesetztem Sinne wirkt wie oben.

Um die Genauigkeit der auf diese Art erhaltenen Resultate zu prüfen, wurde noch eine andere Methode zur Bestimmung des Auflagedrucks angewandt. Er wurde bei Stromdurchgang durch Belasten der Wagschale stetig verringert; gleichzeitig wurde der Uebergangswiderstand gemessen und als Funktion der aufgelegten Gewichte aufgetragen (Fig. 3). Eine Tangente an die Kurve senkrecht zur Abscissenachse schneidet auf dieser den Auflagedruck aus. Auch diese Messung lässt sich natürlich bei laufender Maschine ausführen. Die beiden Methoden ergaben auf 2 bis 3% übereinstimmende Resultate.

Fig. 3.



Es wurde bei späteren Messungen jedoch nur noch die erst beschriebene angewandt, da bei der zweiten bei niederen Auflagedrucken leicht Funken auftraten und der Ring anschmorte.

Dagegen wurde bei Bestimmung der Abhängigkeit des Widerstands vom Auflagedruck die Variation stets durch allmähliches Ausgewichten des Federdrucks vorgenommen, was eine rasche und exakte Messung ermöglichte. Um die Genauigkeit dieses Verfahrens zu prüfen, wurden Versuche bei verschiedenen Federspannungen vorgenommen; dieselben sind in Tafel 13 und 14 wiedergegeben.

Beschreibung der Versuche. Die Versuche wurden sämtlich im Laboratorium des elektrotechnischen Instituts der Technischen Hochschule in Karlsruhe ausgeführt. Die verwendeten Kohlen hatten

eine Kontaktfläche von ca. 3 qcm und zwar betrug die Länge in der Drehrichtung etwa 1,5 cm und die Breite ca. 2 cm. Sie wurden auf die Schleifringe eines Umformers der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft von 10 Kilowatt aufgesetzt, welcher mit Riemen angetrieben war. Der Ringdurchmesser betrug 156 mm, die Breite 25 mm. Als Bürstenhalter kamen die normalen A.E.G.-Halter der Maschine, wie sie in Fig. 2 skizziert sind, zur Verwendung.

Die Messungen wurden mit fünf in der Praxis gebräuchlichen Kohlensorten vorgenommen. Von Versuchen mit noch anderen Sorten wurde abgesehen, da das genaue Einschleifen und Einlaufenlassen der Kohlen für jede neue Kohle beträchtliche Zeit beansprucht und die untersuchten Sorten zur Charakterisierung der Unterschiede wohl ausreichen dürften. Die Sorten sind in der Reihenfolge, wie sie nacheinander untersucht wurden, numeriert. Diese Art der Numerierung erscheint deshalb wünschenswert, weil die bei den Versuchen mit den ersten Sorten gemachten Beobachtungen bei den späteren Untersuchungen verwendet wurden. Hauptsächlich unterschieden sich die verschiedenen Arten durch ihre Härte; diese war zum Teil aus Angaben der liefernden Firmen bekannt; hauptsächlich zeigte sich der Härtegrad aber auch deutlich beim Einschleifen.

Die I. Sorte fand ich bei Beginn der Versuche an der Maschine vor; es ist eine Kohle von mittlerer Härte; welches Fabrikat, konnte ich nicht in Erfahrung bringen.

Sorte II ist eine sehr harte Kohle aus der Fabrik von Dr. Albert Lessing, Nürnberg.

Sorte III ist eine sehr weiche, elektrographitische Bürste. Sie entstammt der Fabrik Le Carbone in Levallois-Perret bei Paris und wird von ihr als Marke X bezeichnet.

Die Sorten IV und V wurden von Siemens & Co., Charlottenburg zur Verfügung gestellt. Sorte IV ist die härteste Qualität (Marke Gr. R.) und Sorte V die weichste Qualität (Marke S), welche diese Fabrik zur Zeit der Versuche herstellte.

Die Versuche erstreckten sich hauptsächlich auf die Abhängigkeit des Uebergangswiderstands von der Stromdichte unter den Bürsten, von der Geschwindigkeit, mit der die Ringoberfläche rotiert und von dem Auflagedruck, mit welchem die Kontakte gegen den Stromabgeber gepresst werden.

1. Die Variation der Stromdichte wurde durch Aenderung der Stromstärke mittels Vorschaltwiderständen bewerkstelligt. Bei diesen Versuchen zeigte sich eine Reihe von merkwürdigen Er-

scheinungen, welche bei allen Kohlensorten in gleicher Weise auftraten und im folgenden näher beschrieben werden sollen.

Bei Aenderung der Stromstärke, also auch der Stromdichte, ist der Widerstand, der sich sofort nach Einstellung einer neuen Stromdichte ergibt, von der vorhergehenden abhängig. Er ändert sich dann langsam und stetig, bis er bei einem jeder Stromdichte zugehörenden Wert konstant bleibt. Bei Uebergang von höheren Stromdichten zu niedereren ist der Anfangswert kleiner als der Endwert, beim Uebergang von niederen zu hohen grösser. Dieser Endwert ist jedoch für beide Fälle gleich, so dass man für jede Stromdichte nur einen Wert erhält. Man kann diese Erscheinung bei der angegebenen Messanordnung direkt an der Anzeige des Voltmeters verfolgen, da ja der Widerstand bei Konstanthalten der Stromdichte resp. Stromstärke dem Spannungsabfall proportional ist. Die Widerstandsänderung erfolgt stetig, anfangs rascher, bei Annäherung an den Endwert langsamer. Die Aenderungen sind um so stärker, je grösser der Sprung der Stromdichte zwischen zwei Messungen ist. Der ganze Vorgang dauerte meist 10 bis 15 Minuten je nach der Differenz der Stromdichten bei zwei aufeinanderfolgenden Messungen. Bei sämtlichen Versuchen wurde deshalb nach Einstellung einer neuen Stromdichte jeweils so lange gewartet, bis das Voltmeter einige Zeit konstant denselben Wert anzeigte, der Widerstand also den der neuen Stromdichte entsprechenden Wert angenommen hatte. In Tabelle 1, in der Versuche mit Kohlensorte I wiedergegeben sind, sind die Anfangswerte, die sich kurz nach Aenderung der Stromdichte ergaben und die Endwerte eingetragen. In die zugehörige Kurve Tafel 1 sind nur die endgültigen Werte aufgenommen und ebenso sind in allen folgenden Tafeln und Tabellen nur diese angegeben.

Auch direkt nach dem Anlassen der Maschine ist der Widerstand jeweils anfangs grösser und sinkt allmählich ab. Beim Abschmirgeln des Rings fällt er sehr stark ab, steigt jedoch dann sofort wieder langsam an; der Ring wird dabei durch die starke Reibung sehr heiss. Bei stromlosem Ring konnte keine Potentialdifferenz zwischen Ring und Kohle festgestellt werden.

Die Untersuchungen über die Abhängigkeit des Uebergangswiderstands von der Stromdichte ergaben ferner, dass es für jede Kohlensorte eine Belastungsgrenze, d. h. eine maximale Stromdichte gibt, jenseits der die Kontakte nicht mehr regulär arbeiten. Es zeigten sich nämlich bei höheren Stromdichten Erscheinungen von Ueberlastung. Der Widerstand stieg plötzlich stark an, ohne dass an der Stromdichte

etwas geändert wurde, und das Voltmeter, welches ihn angab, zeigte überhaupt keinen konstanten Wert mehr, sondern schwankte unregelmässig hin und her. Es wurde dabei beobachtet, dass diese Belastungsgrenze von der Ringgeschwindigkeit beeinflusst wird und bei langsamem Lauf höher liegt als bei schnellerem, so dass man also bei Wahl von hohen Umfangsgeschwindigkeiten die Kohlen nicht so stark belasten darf, wie bei niedrigeren. Die Kohlen werden bei Stromdichten in der Nähe der Belastungsgrenze sehr heiss und ihre Kontaktfläche wird, wie es scheint, bei Ueberlastung verändert, was man daraus schliessen kann, dass der Uebergangswiderstand nach einer Ueberlastung öfters auch bei mittleren Stromdichten höher war, als er vor der Ueberlastung gemessen worden war.

Die numerischen Ergebnisse der Versuche über die Abhängigkeit des Uebergangswiderstands von der Stromdichte sind in den Tabellen 1 bis 8 und den zugehörigen Tafeln 1 bis 8 wiedergegeben. Die Schlüsse, welche sich aus denselben ziehen lassen, sollen erst später angegeben und erläutert werden.

Uebergangswiderstand verschiedener Kohlensorten abhängig von der Stromdichte.

Tabelle 1 (Tafel 1).

Kohlensorte I. Kontaktfläche $F = 2{,}02 \times 1{,}51 = 3{,}05$ qcm. Auflagedruck/qcm $g = 136$ g. Ringgeschwindigkeit $v = 7{,}14$ m/Sek.

Stromdichte s Amp./qcm	Anfangsspannung E_a Volt	Endspannung E_e Volt	Anfangswert des spezifischen Widerstandes w_a Ohm	Endwert des spezifischen Widerstandes w_e Ohm
9,54	1,39	1,24	0,147	0,130
11,8	—[1]	1,18	—	0,100
8,55	1,10	1,16	0,129	0,136
6,00	1,04	1,17	0,174	0,195
4,78	—[1]	1,17	—	0,245
8,8	1,38	1,35	0,157	0,153
6,3	1,19	1,34	0,189	0,212
4,58	1,25	1,32	0,276	0,292
3,05	1,21	1,29	0,346	0,424
1,73	1,10	1,15	0,636	0,665
1,01	0,9	1,12	0,89	1,12
0,425	—[1]	0,75	—	1,77
3,05	1,35	1,34	0,443	0,44
6,65	—[1]	1,37	—	0,206

[1]) Nicht aufgenommen.

Tafel 1.

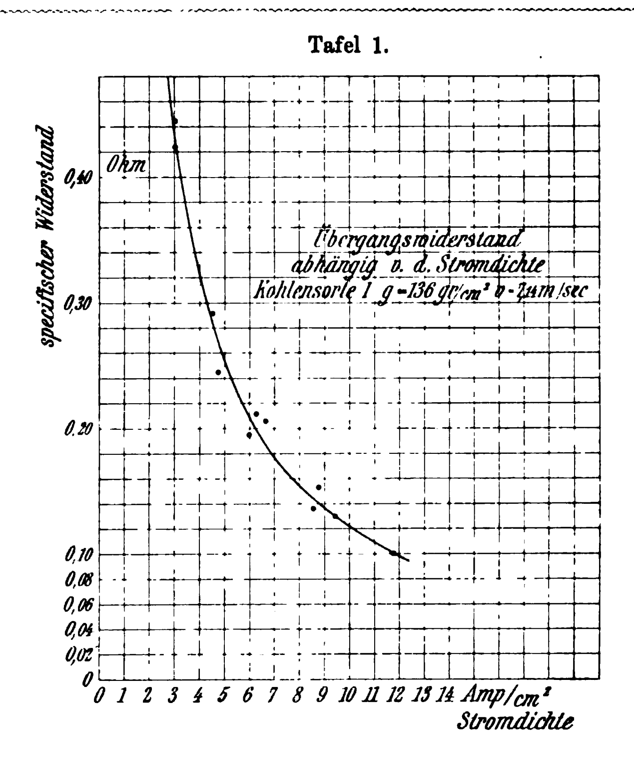


Tabelle 2 (Tafel 2).

Kohlensorte II. F = 3,00 qcm. v = 6,65 m/Sek.

A. g = 95 g/qcm.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
0,433	0,62	1,43
1,87	1,20	0,64
3,23	1,45	0,447
4,96	1,54	0,312
6,76	1,68	0,249
8,06	1,57	0,195
9,16	1,53	0,168
6,76	1,35	0,205
5,46	1,52	0,278
3,9	1,46	0,376
1,87	0,85	0,45
0,43	0,79	1,83

B. g = 168 g/qcm.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
0,7	0,53	0,77
1,97	0,79	0,398
3,33	0,84	0,252
4,7	0,92	0,215
6,9	1,16	0,172
8,7	1,39	0,147
6,0	1,12	0,187
4,7	0,98	0,208
2,03	0,67	0,328
0,73	0,51	0,70
7,27	1,23	0,169

Tafel 2.

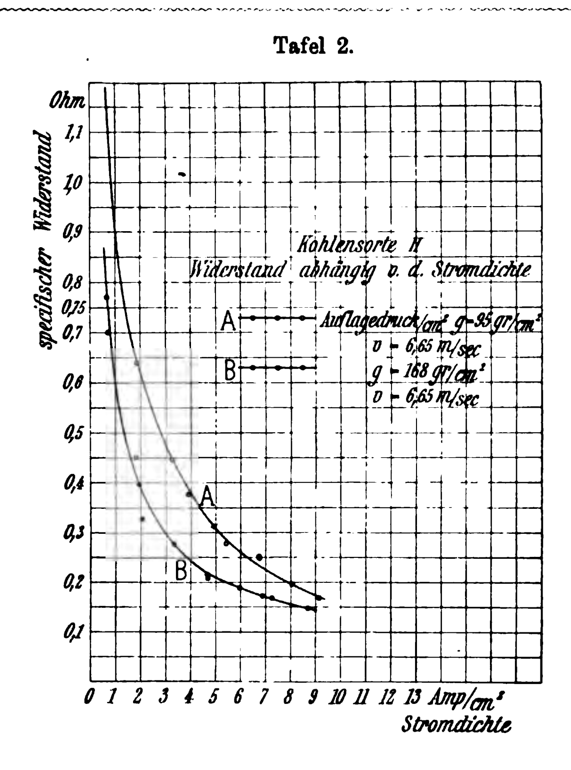


Tabelle 8 (Tafel 8).

Kohlensorte III. Kontaktfläche F = 3,00 qcm. Auflagedruck/qcm g = 181 g.
(Hoher Auflagedruck.)

I. v = 1,18 m/Sek.
II. v = 4,84 „
III. v = 7,58 m/Sek.
IV. v = 11,5 „

I.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
3,17	0,34	0,107
9,8	0,45	0,0458
14,4	0,48	0,0333
5,97	0,37	0,0617
3,48	0,31	0,089
1,44	0,27	0,187
7,5	0,40	0,0534
11,9	0,42	0,0353
2,27	0,25	0,110

II.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
5,43	0,445	0,082
8,77	0,44	0,0502
12,1	0,415	0,0343
3,43	0,41	0,119
2,1	0,38	0,181

III.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
7,23	0,44	0,061
1,43	0,40	0,279
3,43	0,49	0,143
6,78	0,48	0,071
10,1	0,50	0,0495
14,47	0,45	0,0311
8,43	0,43	0,051

IV.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
6·1	0,40	0,0655
9,43	0,51	0,0542
12,27	0,55	0,0448
3,43	0,37	0,108
1,43	0,34	0,237

Tabelle 4 (Tafel 4).

Kohlensorte III. (Mittlerer Auflagedruck.)

I.	F = 2,72 qcm,	g = 151 g/qcm,	v = 3,3 m/Sek.
II.	F = 2,72 „	g = 151 „	v = 6,35 „
III.	F = 2,72 „	g = 151 „	v = 8,17 „
IV.	F = 2,72 „	g = 151 „	v = 9,5 „
V.	F = 300 „	g = 143 „	v = 6,54 „

I.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
16,6	0,55	0,0331
12,6	0,52	0,0513
7,87	0,48	0,0613
3,38	0,46	0,136
1,47	0,38	0,258

III.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
16,6	0,535	0,0322
13,7	0,51	0,0372
10,4	0,46	0,0443
7,46	0,42	0,056
4,45	0,38	0,0855
1,47	0,34	0,0231
2,32	0,40	0,0173

II.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
19,1	0,66	0,0345
15,2	0,62	0,0408
11,8	0,57	0,0484
7,35	0,56	0,0762
4,25	0,47	0,110
2,73	0,47	0,172
1,25	0,39	0,31
11,8	0,60	0,0508

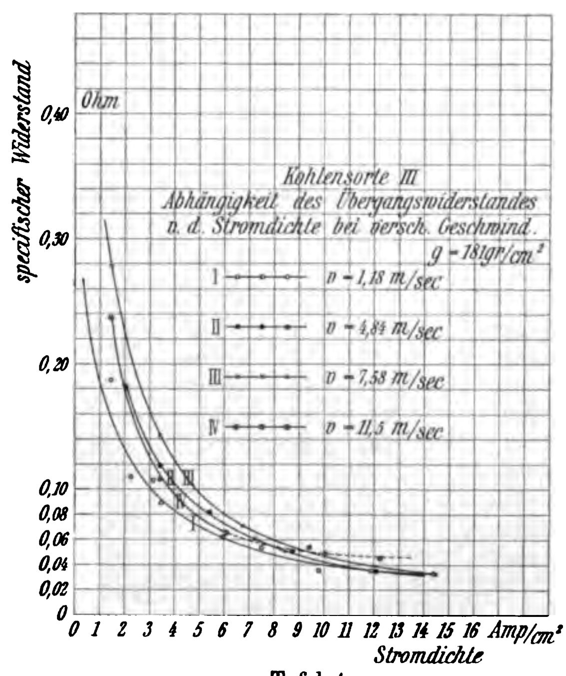
IV.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
16,6	0,51	0,0307
13,0	0,49	0,0377
9,34	0,45	0,0482
5,9	0,41	0,0694
2,83	0,36	0,127
1,47	0,32	0,217

V.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
0,983	0,43	0,466
1,97	0,47	0,242
3,67	0,50	0,138
5,03	0,51	0,101
6,4	0,52	0,082
7,78	0,53	0,0683
9,08	0,53	0,0583
11,6	0,54	0,047
14,1	0,54	0,039
12,5	0,60	0,0484
9,9	0,62	0,059
6,94	0,55	0,0785
4,56	0,54	0,115

Tafel 3.



Tafel 4.

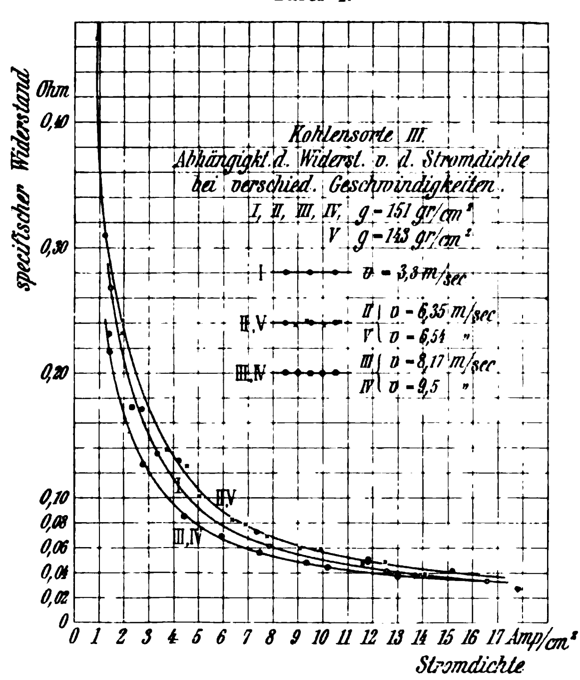


Tabelle 5 (Tafel 5).

Kohlensorte III. (Niederer Auflagedruck.) F = 2,72 qcm. g = 80 g/qcm.

I. v = 1,18 m/Sek.
II. v = 4,84 „
III. v = 7,58 „

I.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
10,8	0,51	0,0472
15,9	0,55	0,0346
6,6	0,41	0,0621
3,83	0,38	0,099
1,59	0,32	0,201
8,28	0,43	0,052
13,3	0,46	0,0346
2,5	0,33	0,132
3,5	0,33	0,094

II.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
6,00	0,48	0,0716
9,7	0,51	0,0526
13,35	0,54	0,0405
3,8	0,45	0,118
2,32	0,44	0,190

III.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
7,9	0,64	0,081
1,57	0,44	0,28
3,8	0,50	0,132
7,5	0,59	0,079
11,1	0,63	0,058
16,0	0,80	0,048
9,31	0,75	0,080

Tafel 5.

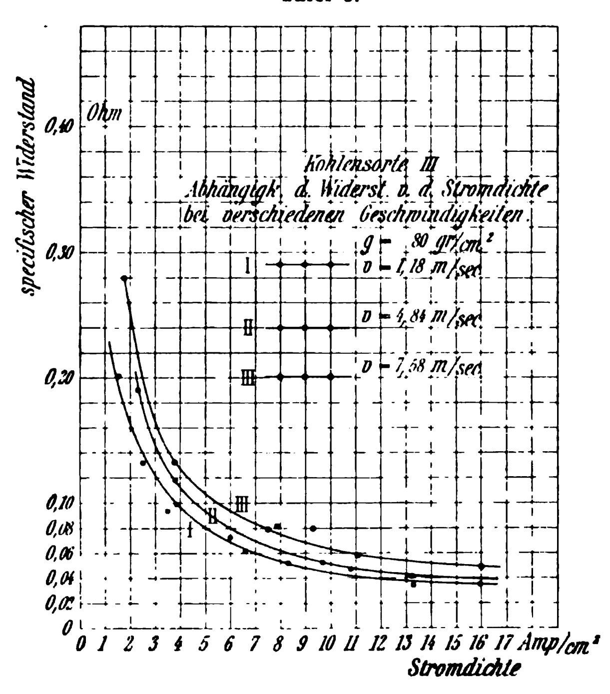


Tabelle 6 (Tafel 6).

Kohlensorte III. Kontaktfläche F = 3,16 qcm. Auflagedruck/qcm = 117 g/qcm.

I. v = 2,08 m/Sek.
II. v = 7,15 „
III. v = 9,8 „

I.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
4,59	1,04	0,227
6,43[1]	1,22	0,174
3,26	0,98	0,301
1,68	0,85	0,505

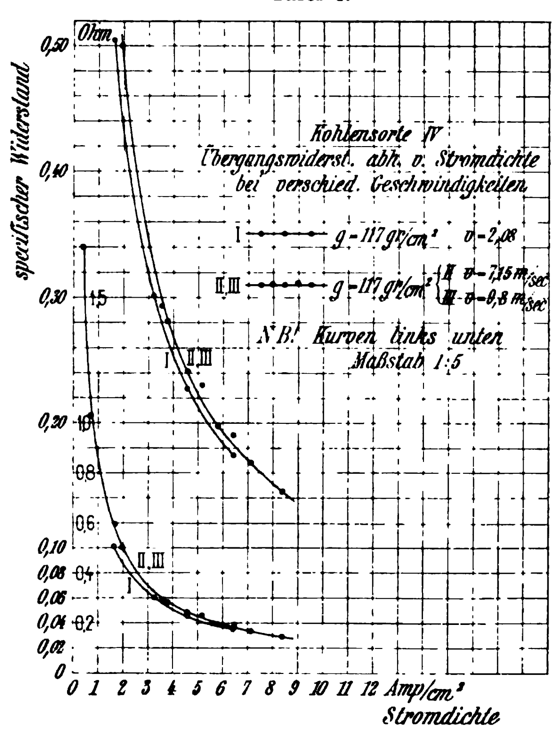
II.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
8,4[1]	1,22	0,145
5,8	1,14	0,197
3,8	1,07	0,281
2,0	1,00	0,50
0,728	0,75	1,03
0,443	0,75	1,7
7,12	1,20	0,168
4,6	1,11	0,241

III.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
1,58	0,94	0,595
3,58	1,05	0,293
5,16	1,19	0,230
6,44[1]	1,22	0,190
1,58	0,94	0,595

Tafel 6.



[1]) Bei höheren Stromdichten traten Funken auf.

Tafel 7.

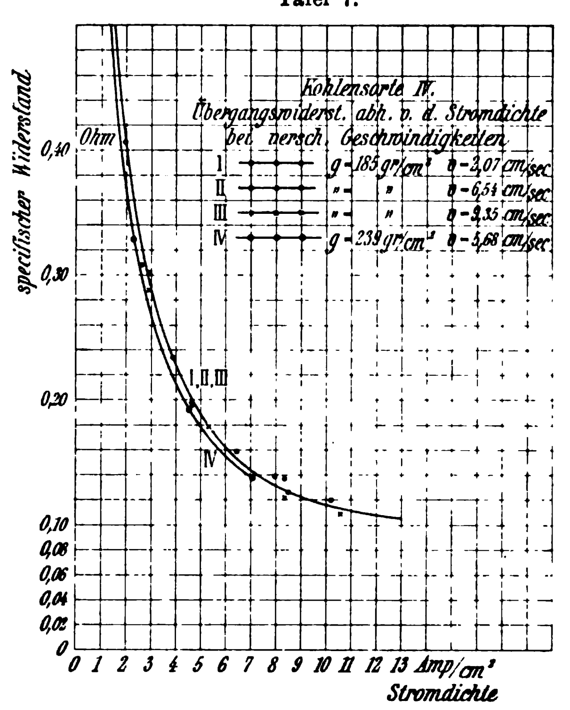


Tabelle 7 (Tafel 7).

Kohlensorte IV. (Hoher Auflagedruck.) Kontaktfläche F = 3,16 qcm.

I. g = 185 g/qcm, v = 2,07 m/Sek.
II. g = 185 „ v = 6,54 „
III. g = 185 „ v = 9,35 „
IV. g = 239 „ v = 5,68 „

I.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
4,65	0,92	0,198
1,99	0,83	0,407
2,94	0,89	0,302
3,9	0,91	0,234
8,36	1,15	0,137

II.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
1,36	0,74	0,544
2,66	0,82	0,308
4,65	0,91	0,196
6,43	1,02	0,159
7,98	1,11	0,138
10,2	1,22	0,120
4,65	0,91	0,196
8,50	1,07	0,126

III.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
8,39	1,02	0,122
10,52	1,15	0,109
5,31	0,95	0,179
2,95	0,85	0,288

IV.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
7,06	0,98	0,138
4,53	0,87	0,192
2,31	0,76	0,329
1,36	0,71	0,52

Tabelle 8 (Tafel 8).

Kohlensorte V. Umfangsgeschwindigkeit v = 6,2 m/Sek.

A. Niederer Auflagedruck. g = 119 g/qcm. F = 3,00 qcm.
B. Hoher Auflagedruck. g = 160 „ F = 3,10 „

I. Stromrichtung: Metall nach Kohle,
II. Stromrichtung: Kohle nach Metall.

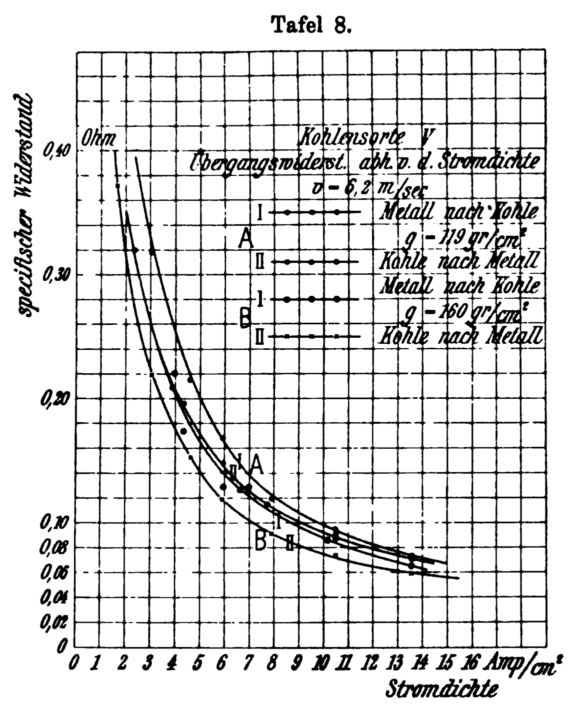
A. I.

J Amp.	s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
24,5	7,9	0,94	0,119
18,4	5,95	1,00	0,168
14,45	4,66	1,00	0,215
9,35	3,05	0,97	0,318
5,25	1,69	0,97	0,575
2,5	0,806	0,85	1,05
0,9	0,291	0,75	2,58
0,81	0,261	0,75	2,87
0,46	0,148	0,72	4,86
0,13	0,042	0,72	17,1
0,061	0,0197	0,64	33,7
0,011	0,0035	0,19	54,2
0,0172	0,00565	0,25	44,2
0,030	0,0097	0,42	43,4
0,002	0,000642	0,03	47,0
0,0011	0,000395	0,02	55,6
32,5	10,5	0,99	0,0944
42,05	13,59	1,00	0,0736

A. II.

J Amp.	s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
0,006	0,00194	0,105	53,0
0,0105	0,0034	0,15	44,2
0,068	0,0219	0,33	15,1
0,021	0,0068	0,20	29,4
0,124	0,040	0,35	8,75
0,45	0,145	0,45	3,1
1,1	0,356	0,50	1,4
3,24	1,05	0,65	0,62
7,3	2,37	0,76	0,32
13,4	4,34	0,85	0,196
18,5	5,98	0,87	0,148
24,0	7,75	0,89	0,115
31,6	10,2	0,87	0,085
21,6	6,98	0,88	0,126
12,3	3,98	0,83	0,209
32,5	10,5	0,95	0,0905
42,05	13,59	0,96	0,0706

Tafel 8.



B. I.

J Amp.	s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
0,006	0,00194	0,07	36,0
0,0105	0,0034	0,15	44,2
0,068	0,0219	0,45	20,5
0,021	0,0068	0,27	39,7
0,124	0,040	0,57	14,3
0,45	0,145	0,55	3,79
1,1	0,356	0,58	1,63
3,24	1,05	0,65	0,62
7,3	2,37	0,76	0,321
13,4	4,34	0,75	0,173
18,5	5,98	0,77	0,129
24,0	7,75	0,89	0,115
31,6	10,2	0,88	0,086
21,6	6,98	0,90	0,129
12,3	3,98	0,88	0,221
20,6	6,66	0,84	0,126
32,5	10,5	0,92	0,088
42,05	13,59	0,88	0,0648

B. II.

J Amp.	s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
24,5	7,9	0,72	0,091
18,4	5,95	0,70	0,118
14,45	4,66	0,71	0,152
9,35	3,05	0,67	0,219
5,25	1,69	0,63	0,372
2,5	0,806	0,52	0,645
0,9	0,291	0,48	1,65
0,81	0,261	0,5	1,91
0,46	0,148	0,38	2,57
0,13	0,042	0,275	6,55
0,061	0,0197	0,26	13,2
0,011	0,0035	0,055	15,7
0,0172	0,00565	0,10	17,7
0,030	0,0097	0,16	16,5
0,002	0,000642	0,01	15,5
0,0011	0,000359	0,01	27,8
32,5	10,5	0,67	0,0638
42,05	13,59	0,80	0,059

2. Eine weitere Reihe von Versuchen hatte den Zweck, zu bestimmen, wie der Uebergangswiderstand der einzelnen Sorten von der Umfangsgeschwindigkeit des Stromabnehmers beeinflusst wird. Eine Abhängigkeit von dieser könnte allenfalls von Bedeutung sein für die Wahl der Tourenzahl von Gleichstrommaschinen oder bei der Dimensionierung der Kollektoren, da durch diese bei gegebener Tourenzahl der Maschine die Umfangsgeschwindigkeit bedingt ist. Es kommt daher darauf an, für jede Ringgeschwindigkeit den Wert des Uebergangswiderstandes festzustellen, der einer dauernd konstanten Drehung mit dieser Geschwindigkeit entspricht. In Anbetracht davon und auf Grund der Beobachtungen über die allmählichen Aenderungen des Widerstands bei Variation der Stromdichte wurden die Messungen so vorgenommen, dass die Geschwindigkeit für jede einzelne Aufnahme längere Zeit konstant gehalten und der endgültige Wert des Widerstandes erst aufgenommen wurde, wenn die Verhältnisse sich der jeweiligen Geschwindigkeit angepasst hatten. Zufällige Aenderungen wurden dabei dadurch aus dem Resultat ausgeschaltet, dass jede Versuchsreihe doppelt mit steigender und mit fallender Geschwindigkeit aufgenommen wurde. Es zeigten sich ähnliche allmähliche Aenderungen wie bei den Messungen mit variabler Stromdichte, jedoch konnten keine vollständig gleichmässigen Resultate erzielt werden. Dass man aber die Erscheinung nicht vollständig ausser acht lassen darf, ergaben Versuche mit Kohlensorte II. Bei diesen wurde der Widerstand erst bei rascher Variation der Geschwindigkeit und dann unter sonst gleichen Verhältnissen in einer Daueruntersuchung bestimmt. Bei rascher Variation blieb der Widerstand stets annähernd konstant, dagegen ergaben die Dauerversuche allmähliche, regelmässig wiederkehrende Aenderungen. Einer dieser Versuche ist in Tabelle 10 resp. Tafel 10 wiedergegeben. .Tabelle 9 enthält die Dauerversuche für Kohlensorte I. Die Dauerversuche mit Sorte III und IV ergaben keine regelmässigen Kurven. Es wurden daher bei diesen Sorten die Messungen über die Abhängigkeit des Widerstands von der Stromdichte bei verschiedenen Geschwindigkeiten vorgenommen und mit den hierbei erhaltenen Kurven (Tafeln 3 bis 7) die Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bestimmt.

Tabelle 9 (Tafel 9).

Kohlensorte I. F = 3,05 qcm. g = 136 g/qcm. s = 6,85 Amp./qcm.

v m/Sek.	E Volt	w Ohm	v m/Sek.	E Volt	w Ohm
9,35	0,92	0,134	3,12	1,24	0,181
7,94	1,08	0,158	1,9	1,22	0,179
8,60	1,08	0,158	0	0,95	0,138
9,25	0,99	0,145	1,77	1,24	0,181
8,45	1,08	0,158	3,53	1,28	0,187
7,40	1,11	0,163	4,69	1,23	0,180
6,64	1,19	0,174	7,11	1,12	0,164
4,77	1,24	0,181	9,35	1,09	0,159
3,85	1,24	0,181			

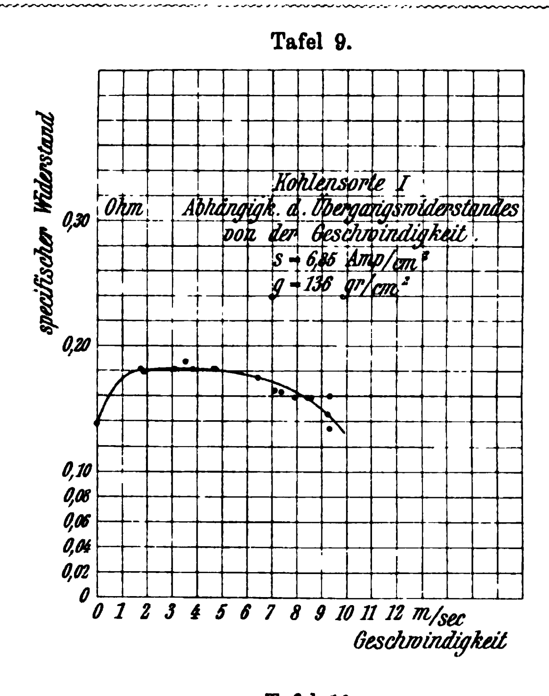
Tabelle 10 (Tafel 10).

Kohlensorte II. Kontaktfläche F = 3,00 qcm. Spezifischer Auflagedruck g = 95 g/qcm.

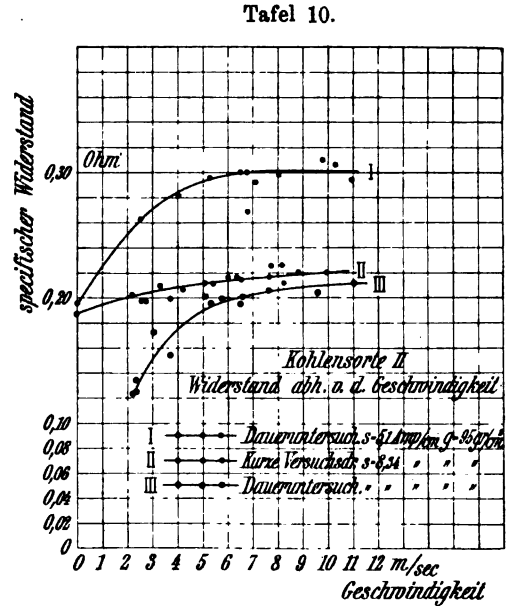
I. Stromdichte s = 5,1 Amp./qcm (Daueruntersuchung).
II. Stromdichte s = 8,43 „ (bei rascher Variation).
III. Stromdichte s = 8,43 „ (Daueruntersuchung).

I.			II.			III.		
v m/Sek.	E Volt	w Ohm	v m/Sek.	E Volt	w Ohm	v m/Sek.	E Volt	w Ohm
11,00	1,5	0,294	6,7	1,80	0,214	2,25	1,04	0,123
9,84	1,58	0,31	6,4	1,82	0,216	3,33	1,07	0,127
8,10	1,52	0,298	4,26	1,74	0,206	2,40	1,05	0.125
6,85	1,32	0,259	3,32	1,76	0,209	3,73	1,3	0,154
7,15	1,49	0,292	2,78	1,66	0,197	5,15	1,69	0,200
6,54	1,53	0,30	0	1,58	0,187	5,80	1,68	0,199
6,8	1,53	0,30	2,22	1,70	0,202	6,61	1,69	0,200
5,32	1,51	0,296	2,60	1,66	0,197	7,69	1,73	0,205
4,08	1,44	0,282	3,72	1,68	0,199	9,6	1,72	0,204
2,57	1,34	0,263	5,15	1,78	0,211	11,1	1,78	0,211
6,56	1,53	0,30	5,44	1,78	0,211	5,4	1,65	0,195
10.35	1,56	0,306	6,05	1,82	0,216	3,06	1,45	0,172
0	1,00	0,196	6,57	1,80	0,214	6,55	1,64	0,195
			7,7	1,82	0,216	2,35	1,15	0,134
			8,3	1,78	0,211			

Tafel 9.



Tafel 10.



3. Die Versuche über die Abhängigkeit des Uebergangswiderstands der verschiedenen Kohlensorten vom Auf-

lagedruck geben zu keinen besonderen Bemerkungen Anlass. Die numerischen Ergebnisse sind in den Tabellen 11 bis 14 und den zugehörigen Tafeln gegeben.

Tabelle 11 (Tafel 11).

Kohlensorte I. Kontaktfläche F = 3,05 qcm. Stromdichte s = 6,0 Amp./qcm. Geschwindigkeit v = 6,35 m/Sek.

g g/qcm	E Volt	w Ohm	g g/qcm	E Volt	w Ohm
130	1,35	0,225	31	1,57	0,262
104	1,44	0,24	15	1,74	0,290
97	1,51	0,252	8,5	2,7	0,451
80	1,54	0,257	5,3	3,4	0,568
64	1,54	0,257	1,96	4,5	0,75
48	1,56	0.260			

Tafel 11.

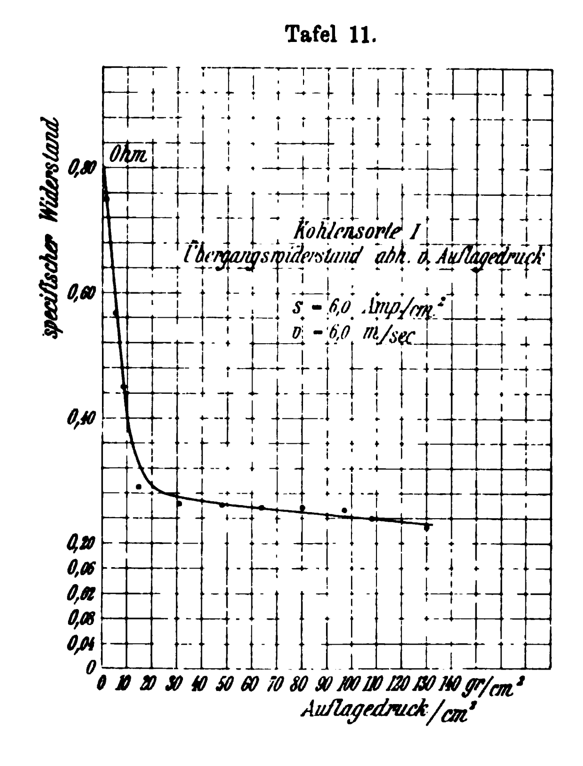


Tabelle 12 (Tafel 12).

Kohlensorte II.

I. F = 3,00 qcm. s = 6,73 Amp./qcm. v = 5,11 m/Sek.
II. F = 2,60 „ s = 7,82 „ v = 6,5 „

I.

g g/qcm	E Volt	w Ohm	g g/qcm	E Volt	w Ohm
233	0,88	0,131	60	1,35	0,201
193	0,93	0,138	93	1,28	0,191
160	1,00	0,149	160	1,06	0,158
127	1,11	0,165	233	0,88	0,131
93	1,28	0,191	93	1,36	0,203
60	1,41	0,210	60	1,50	0,224
27	1,78	0,264	43	1,59	0,238
60	1,32	0,197	37	1,63	0,243
43	1,48	0,221	30	1,83	0,273
37	1,58	0,235	93	1,32	0,197
43	1,46	0,227	233	0,88	0,131
37	1,56	0,233			

II.

g g/qcm	E Volt	w Ohm
162	0,93	0,119
185	1,04	0,133
115	1,14	0,146
96	1,24	0,159
77	1,41	0,180
58	1,51	0,193
38	1,66	0,212
31	1,83	0,234
23	3,00	0,384

Tafel 12.

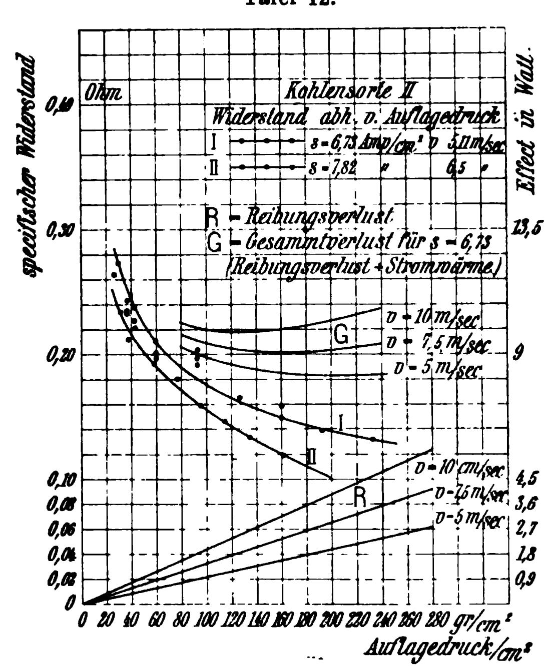


Tabelle 18 (Tafel 18).

Kohlensorte III. Kontaktfläche F = 3,00 qcm.

A. Ringgeschwindigkeit v = 0. Stromdichte s = 6,77 Amp./qcm.
B. v = 6,54 m/Sek. s = 6,77 Amp./qcm.

I. Auszubalancierender Auflagedruck[1]) g_0 = 309 g/qcm.
II. Auszubalancierender Auflagedruck g_0 = 187 „
III. Auszubalancierender Auflagedruck g_0 = 44 „

A.

g g/qcm	E Volt	w Ohm
309	0,19	0,028
287	0,25	0,0368
175	0,34	0,0502
106	0,445	0,0655
73	0,54	0,0796
41	0,77	0,113
24,5	0,99	0,146
18	0,90	0,133
12	0,97	0,143
8	1,02	0,150

B. I.

g g/qcm	E Volt	w Ohm
308	0,47	0,071
269	0,47	0,071
237	0,44	0,0665
204	0,43	0,065
139	0,45	0,068
73	0,51	0,077
41	0,60	0,091
34	0,61	0,0925
24,5	0,68	0,103

B. II.

g g/qcm	E Volt	w Ohm
187	0,40	0,0605
148	0,44	0,0665
116	0,49	0,074
83	0,54	0,0816
51	0,62	0,094
33	0,69	0,105
18	0,80	0,121
4,9	1,5	0,227
51	0,61	0,925

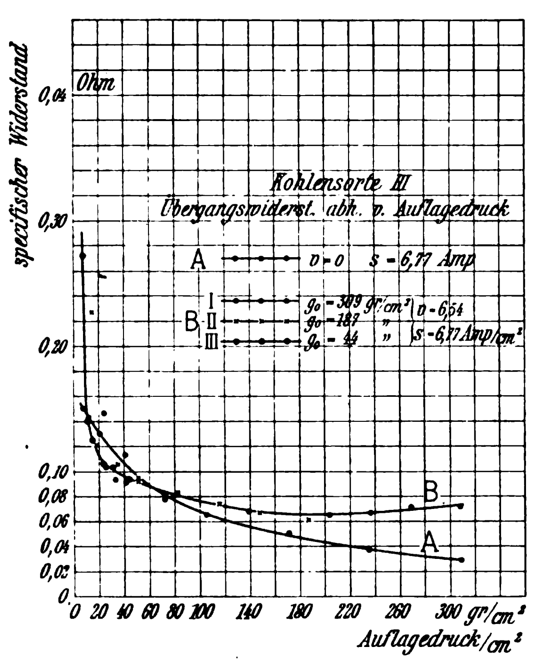
B. III.

g g/qcm	E Volt	w Ohm
44	0,62	0,094
31	0,69	0,103
24	0,70	0,106
18	0,80	0,121
15	0,83	0,125
11	0,93	0,140
8	1,80	0,272

[1]) g_0 ist der durch Federdruck und Eigengewicht hervorgebrachte Auflagedruck, welcher bei der Messung durch Gegengewichte ausbalanciert wird.



Tafel 13.



Tafel 14.

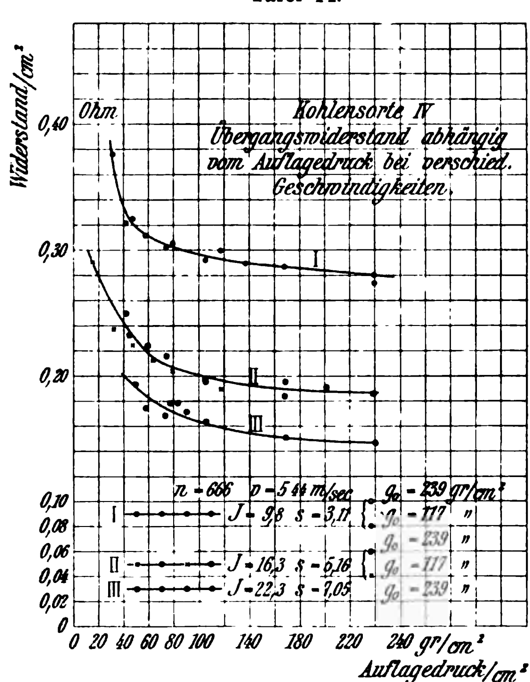


Tabelle 14 (Tafel 14).

Kohlensorte IV. Kontaktfläche F = 3,16 qcm. Geschwindigkeit v = 5,44 m/Sek.

I. Stromdichte s = 3,11. A. g_0 = 239 g/qcm. B. g_0 = 117 g/qcm.
II. Stromdichte s = 5,16. A. g_0 = 239 „ B. g_0 = 117 „
III. Stromdichte s = 7,05. g_0 = 239 „

I.

g g/qcm	E Volt	w Ohm
	A.	
239	0,87	0,279
168	0,89	0,286
137	0,90	0,289
105	0,91	0,292
74	0,94	0,302
58	0,97	0,311
42	1,00	0,321
239	0,85	0,273
	B.	
117	0,93	0,299
79	0,95	0,305
47,5	1,01	0,325
32	1,14	0,376

II.

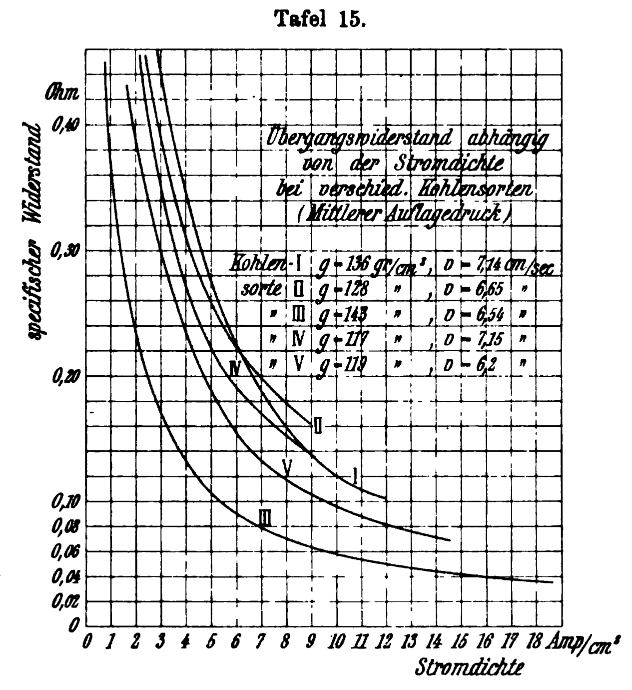
g g/qcm	E Volt	w Ohm
	A.	
239	0,95	0,184
200	0,98	0,190
168	1,00	0,194
105	1,00	0,194
168	0,95	0,184
105	1,01	0,196
74	1,11	0,215
42	1,28	0,249
58	1,15	0,223
45	1,20	0,233
	B.	
117	0,97	0,188
79	1,05	0,203
63	1,09	0,211
47,5	1,15	0,223
32	1,22	0,236
16	1,5	0,290

III.

g g/qcm	E Volt	w Ohm
239	1,02	0,145
168	1,05	0,149
105	1,14	0,162
90	1,20	0,170
83	1,25	0,177
77	1,25	0,177
74	1,18	0,167
58	1,22	0,173
45	1,35	0,192

Ergebnisse der Untersuchungen. Von den betrachteten Variabeln übt die Stromdichte weitaus den grössten Einfluss auf den Uebergangswiderstand aus und die Veränderungen, welche er in Abhängigkeit von Umfangsgeschwindigkeit und Auflagedruck zeigt, treten hiergegen vollständig zurück. Wir wollen daher die einzelnen Sorten vor allem mit Rücksicht hierauf gegenüberstellen und vergleichen. Auf Tafel 15 und 16 sind die für mittlere Ringgeschwindigkeiten erhaltenen Resultate zusammengestellt. Genau gleicher Auflagedruck für alle Sorten konnte nicht erreicht werden, da die Feder der Bürstenhalter feinere Einstellungen nicht zuliess. Die Unterschiede sind jedoch nicht gross, und da, wie erwähnt, die Variationen des Widerstands mit dem Auflagedruck zurücktreten gegen die betrachtete Abhängigkeit von der Stromdichte, kann man die dargestellten Kurven

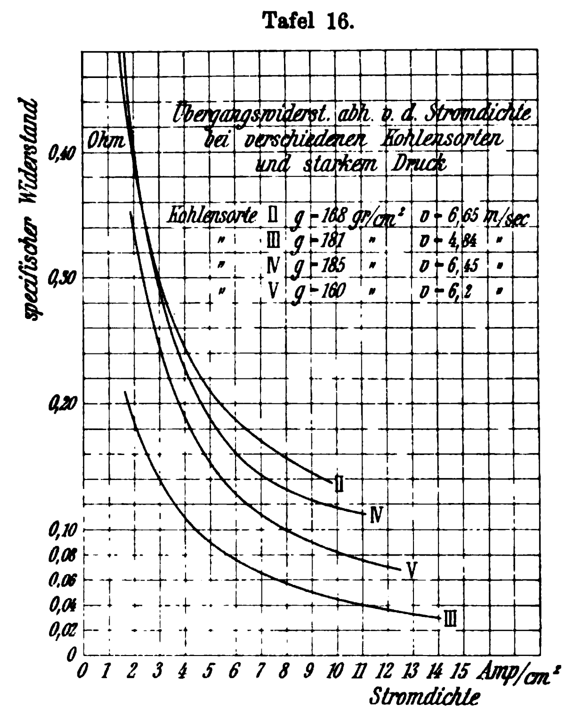
Tafel 15.



direkt miteinander vergleichen. Es ergibt sich, dass die Sorte III bei weitem den geringsten Uebergangswiderstand hat; dann folgen die Sorten V, IV, II. Sorte I lässt sich in die Reihenfolge nicht einordnen, da ihre Kurve die Kurven II und IV schneidet. Nun war von den zur Untersuchung herangezogenen Kohlen Sorte III am weichsten und Sorte IV am härtesten; von den Sorten IV und V, welche ein und derselben Fabrik entstammen, ist IV die härteste und V die weichste Kohle, welche die liefernde Firma fabriziert. Vergleicht man die Grösse des Uebergangswiderstandes der einzelnen Sorten mit diesen Angaben, so sieht man, dass diese von dem Härtegrad der Kohlen abhängig ist und dass der Uebergangswiderstand um so grösser ist, je härter die Kohle. Der Uebergangswiderstand von Sorte III (Le Carbone, X) ist bedeutend geringer als der der anderen Kohlensorten. Die liefernde Firma weist darauf hin und warnt davor, diese Sorte ohne Rücksicht darauf anderen Sorten zu substituieren. Es habe sich in der Praxis herausgestellt, dass dann leicht Funkenbildung eintreten könne. Sie empfiehlt daher, die Kontaktfläche gegenüber andern Sorten auf die Hälfte zu reduzieren.

Entsprechend der Verschiedenheit der Uebergangswiderstände ist auch die Belastungsfähigkeit der einzelnen Sorten je nach der Härte

Tafel 16.



eine andere. Für die sehr harte Sorte II ist die Grenze etwa bei 9 Amp./qcm: Sorte IV erträgt 9 bis 11 Amp./qcm, Sorte I ca. 12 Amp./qcm, Sorte V 14 bis 15 Amp./qcm und die weichste Sorte 15 bis 20 Amp./qcm. Ja die Firma Le Carbone berichtet, dass eine 600-Amp.-Dynamo in Levallois-Perret sogar mit 22,5 Amp./qcm tadellos arbeite.

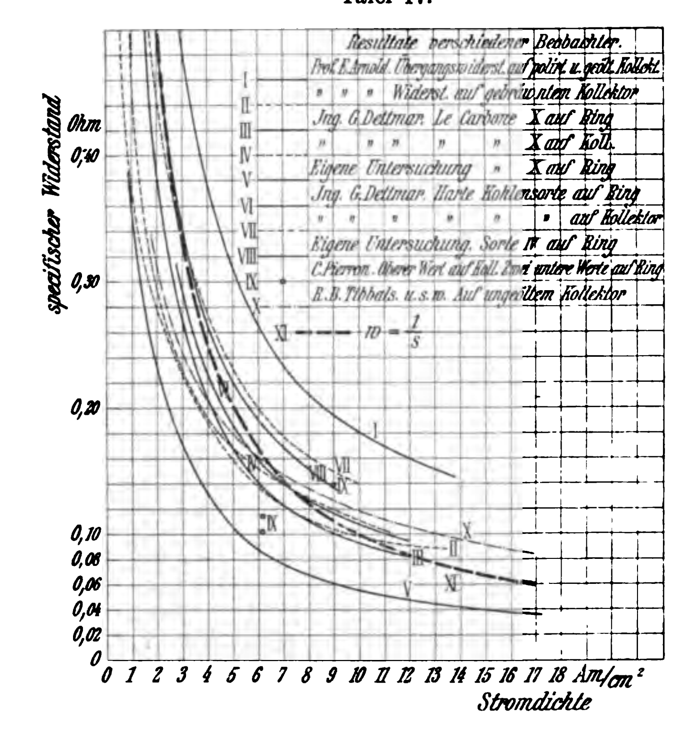
Im Anschluss an diese Vergleichung wurden auch noch die in der Litteratur veröffentlichten Messresultate für Kohlenbürsten auf Tafel 17 zusammengestellt und ausserdem die Kurven für Sorte IV (als mittlere Kurve für die gewöhnlichen Sorten) und III aus Tafel 15 übertragen. Die Unterschiede sind teilweise ziemlich bedeutend, erklären sich aber aus der Verschiedenheit der Versuchsbedingungen und Kohlensorten. Der Uebergangswiderstand ist bei der gleichen Kohle für Kollektoren grösser als für Ringe und wird ausserdem durch die Oberflächenbeschaffenheit der Stromabgeber bedingt; für blank polierten und geölten Kollektor ist er am grössten (Kurve I Tafel 17). Die niedrigsten Werte ergaben die von mir selbst an Ringen angestellten Versuche mit der Kohlensorte III, Le Carbone X (Kurve V). Ing. Dettmar findet für dieselbe Kohlensorte ebenfalls an Ringen höhere

Tabelle 15 (zu Tafel 17).

Versuchsergebnisse verschiedener Beobachter.

Nr.	Beobachter	Veröffentlicht in	g g/qcm	v m/Sek.	Bemerkungen:
I.	Prof. E. Arnold	E.-T. Z. 1899, S. 5	120	6,1	Widerstand bei poliertem und geöltem Kollektor
II.	Prof. E. Arnold	E.-T. Z. 1899, S. 5	120	6,1	Widerstand bei gebräuntem Kollektor
III.	Ing. G. Dettmar	E.-T. Z. 1900, S. 430	139	7,00	Le Carbone X auf Ring
IV.	Ing. G. Dettmar	E.-T. Z. 1900, S. 430	149	>2	Le Carbone X auf Kollektor
V.	Eigene Untersuchung	Tafel 4	143	6,54	Le Carbone X auf Ring
VI.	Ing. G. Dettmar	E.-T. Z. 1900, S. 430	234	6,5	Harte Kohlensorte auf Ring
VII.	Ing. G. Dettmar	E.-T. Z. 1900, S. 430	149	>2	Harte Kohlensorte auf Kollektor
VIII.	Eigene Untersuchung	Tafel 6	117	7,15	Kohlensorte IV auf Ring
IX.	O. Pierron	Bull. de la Soc. ind. de Mulhouse. Janvier 1899.	Wie in der Praxis gebräuchlich	7,8 8,8 7,95	Auf Ring nach 1/4stündigem Lauf: $s = 6{,}16$ Amp./qcm, $w = 0{,}114$ Ohm Auf Ring nach 2stündigem Lauf: $s = 6{,}16$ Amp./qcm, $w = 0{,}102$ Ohm Auf Kollektor: $s = 8{,}99$ Amp./qcm, $w = 0{,}139$ Ohm
X.	R. B. Tibbals, W. Löwenberg, W. G. Burns	El. World Bd. 34, S. 418, Fig. 6	186	—	Bei ungeöltem Kollektor

Tafel 17.



Werte (Kurve III). Diese Kurve (III) wird jedoch bis zu 5 Amp./qcm Stromdichte von Kurve IV, den von Dettmar selbst am Kollektor aufgenommenen Werten stark unterschnitten und es ist doch wohl kaum anzunehmen, dass sich bei derselben Kohle für Kollektoren niederere Werte ergeben als für Schleifringe. Auch aus den Berichten der Firma Le Carbone geht, wie erwähnt, hervor, dass der Uebergangswiderstand für diese Sorte bedeutend kleiner ist als für die sonst gebräuchlichen. Für diese gewöhnlichen Sorten kann man, falls keine genaueren Anhaltspunkte vorhanden sind, vielleicht die Werte, welche sich für Sorte IV ergeben haben, als Mittelwerte annehmen, die auch für Kollektoren gelten (siehe Tafel 15, 16, Tafel 17 Kurve VIII).

Während die Prüfung der Art der Abhängigkeit des Uebergangswiderstands von der Stromdichte für alle Kohlensorten ein übereinstimmendes Resultat ergab, das, wie aus Tafel 17 hervorgeht, mit allen Angaben in der Litteratur vollständig übereinstimmt, waren die Ergebnisse der Messungen, welche die Abhängigkeit von der Ringgeschwindigkeit feststellen sollten, nicht in gleichem Masse exakt und befriedigend. Auch die in der Litteratur veröffentlichten Unter-

suchungen über diesen Gegenstand zeigen, dass man hier je nach den Verhältnissen, unter denen die Messungen vorgenommen werden, zu verschiedenen Resultaten kommen kann. Bei den Versuchen von Prof. E. Arnold und C. Pierron waren Aenderungen des Widerstands konstatiert worden. Der Widerstand stieg bis zu einer bestimmten Geschwindigkeit an und fiel dann bei höheren Geschwindigkeiten wieder ab. Prof. Arnold führte diese Variationen auf Schwingungen der Bürsten zurück und nahm an, dass für das Maximum des Widerstands das Verhältnis zwischen der Eigenschwingungszahl der Bürsten und der Zahl der von den Lamellen ausgeübten Stösse ein besonders ungünstiges sei. Ing. G. Dettmar dagegen hat an Maschinen, deren Kollektor genau rund lief, so dass Bürstenschwingungen nicht auftraten, festgestellt, dass der Widerstand für Geschwindigkeiten von über 2 m/Sek. von der Geschwindigkeit unabhängig ist. Er erhielt dieses Resultat durch Messungen bei Auslauf der Maschine, also rascher Variation der Geschwindigkeit. Allmähliche Aenderungen, welche z. B. durch Einflüsse der Reibungswärme oder der Abkühlung verursacht werden könnten, konnten also nicht in Erscheinung treten. Die auf Seite 453 beschriebenen diesbezüglichen Versuche scheinen jedoch darauf hinzuweisen, dass derartige Wirkungen in der That eintreten können.

Jedoch zeigten sie sich bei den verschiedenen Kohlensorten auf verschiedene Weise. Bei Sorte I blieb der Widerstand von 1 bis 7 m/Sek. nahezu konstant und fiel dann etwas ab (Tafel 9). Bei Sorte II stieg er mit wachsender Geschwindigkeit an (Tafel 10). Für Sorte III ergaben die Versuche (Tafeln 3 bis 5), dass der Widerstand bis zu einer Umfangsgeschwindigkeit von etwa 7 m ansteigt, um dann wieder etwas abzunehmen. Die Variationen sind um so kleiner, je grösser die Stromdichte ist. Bei Sorte IV war der Widerstand für verschiedene Geschwindigkeiten konstant.

Es ergibt sich aus allem diesem, dass, wenn der Kollektor genau rund läuft, so dass die Bürsten nicht in Schwingungen kommen, der Uebergangswiderstand von rasch erfolgenden Geschwindigkeitsänderungen unabhängig ist. Er kann jedoch auch dann für verschiedene Geschwindigkeiten, welche dauernd konstant gehalten werden, etwas verschieden sein. Allgemeine Regeln lassen sich aber für diese Variation nicht aufstellen, auch ist dieselbe nicht sehr gross. Ist der Kollektor nicht genau rund oder schlägt die Maschine, so dass Schwingungen der Bürsten auftreten, so variiert der Widerstand und hat für eine bestimmte Geschwindigkeit einen Maximalwert. Ueber

die Grösse dieser Aenderungen und die kritische Geschwindigkeit lassen sich natürlich keine bestimmten Angaben machen, sondern diese werden in jedem einzelnen Falle verschieden sein, je nach dem Schlagen des Kollektors, der Zahl der Lamellen, dem Gewicht und der Konstruktion der Bürstenhalter u. s. w.

Es kommen, wie man sieht, hier eine ganze Reihe von Faktoren in Betracht, so dass sich von vornherein schwer bestimmte Angaben werden machen lassen. Die Variationen, die sich ergeben, sind jedoch sämtlich namentlich für höhere Stromdichten im Vergleich zu den Aenderungen des Widerstands mit der Stromdichte nicht sehr gross, so dass man am besten thun wird, dieselben nicht zu berücksichtigen.

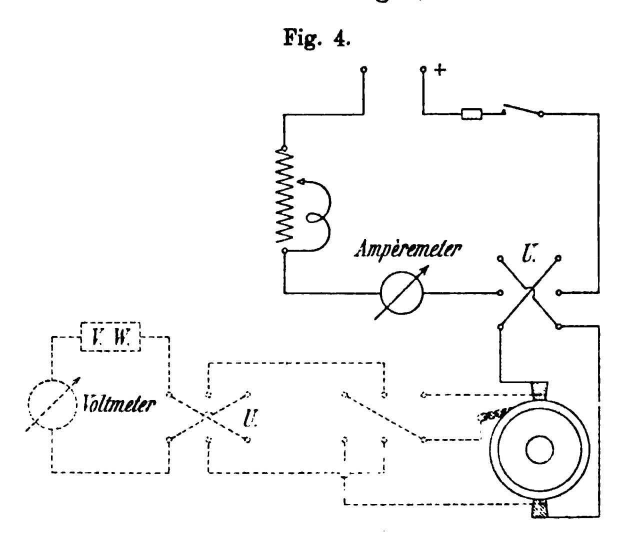
Die Abhängigkeit des Uebergangswiderstands der verschiedenen Kohlensorten vom Auflagedruck ist auf den Tafeln 11 bis 14 dargestellt. Umfangsgeschwindigkeit und Stromdichte haben auf die Art dieser Variation keinen Einfluss. In Uebereinstimmung mit den in der Litteratur veröffentlichten Versuchen zeigte sich bei der Sorte I, III und IV, dass die Aenderung des Widerstands bei den üblichen Drucken nur gering ist und der Widerstand erst bei kleinen Pressungen unter 80 g/qcm stärker ansteigt, die man schon der sicheren Auflage wegen vermeiden wird. Nur für die härteste Sorte (II) zeigte sich eine grössere Abhängigkeit. M a n w i r d d a h e r i m a l l g e m e i n e n d e n A u f l a g e d r u c k s o k l e i n a l s m ö g l i c h w ä h l e n, d a h i e r d u r c h d i e R e i b u n g s a r b e i t a u f i h r M i n i m u m r e d u z i e r t w i r d, w ä h r e n d d i e V e r l u s t e d u r c h S t r o m w ä r m e n u r w e n i g s t e i g e n. Auch für Sorte II wird man sich dabei nicht sehr von den günstigsten Verhältnissen entfernen, wie die in Tafel 12 eingezeichneten Verlustkurven zeigen, so dass man obige Regel für Kohlenbürsten wohl allgemein aufstellen kann.

III. Abhängigkeit des Uebergangswiderstands von der Stromrichtung.

Bei den in Kap. IV behandelten Versuchen mit Wechselstrom hatte es sich ergeben, dass der Uebergangswiderstand auch von der Richtung, in welcher der Strom die Kontaktstelle durchfliesst, beeinflusst wird. Es wurden daraufhin an Kohlensorte V, an der diese Erscheinung konstatiert worden war, Versuche mit Gleichstrom angestellt, und diese ergaben in der That eine Polarität. Wie bei allen vorhergehenden Versuchen wurden zwei Kohlenkontakte auf einen Ring aufgesetzt und der Strom durch den einen eingeleitet und durch den

andern abgeleitet (Schaltungsschema Fig. 4). Die Messungen wurden gleichzeitig an beiden Kohlen ausgeführt und durch öfteres Umkehren der Stromrichtung mit stets gleichem Ergebnis nachgeprüft, so dass es ausgeschlossen ist, dass das Resultat etwa durch zufällige, temporäre Aenderungen veranlasst worden ist. Es ergab sich, dass bei Stromübergang von Kohle nach Metall der Widerstand kleiner ist als bei der Stromrichtung Metall nach Kohle (Tabelle 8, Tafel 8). Der Einfluss trat an beiden Kohlen gleichmässig in Erscheinung, so dass nach dem Umkehren der Stromrichtung jeweils der Widerstand bei der einen Kohle kleiner und bei der andern grösser war als vorher. Auch hier zeigten sich allmähliche Aenderungen, ähnlich wie sie bei den

Fig. 4.



Versuchen mit variabler Stromdichte beschrieben sind. Der Widerstand zeigte sofort nach dem Umschalten einen niederen resp. höheren Wert als vorher, blieb jedoch nicht konstant, sondern die Abweichung von dem bei der andern Stromrichtung gemessenen Wert vergrösserte sich allmählich, so dass zum Beispiel bei Stromumkehr in die Stromrichtung Metall nach Kohle der Wert langsam weiter anstieg, bis sich nach 5 bis 15 Minuten ein konstanter Endwert einstellte.

Da dieses Verhalten bei einer ganzen Reihe von Versuchen stets und gleichmässig eintrat, wird es um so merkwürdiger erscheinen, dass sich bei ruhendem Ring zwar vollständig die gleichen Erscheinungen zeigten, jedoch jeweils bei entgegengesetzter Stromrichtung, so dass hier der Uebergangswiderstand für die Stromrichtung Kohle nach Metall grösser ist, als der für Stromübergang von Metall nach

Tabelle 16 (Tafel 18).

Uebergangswiderstand bei verschiedenen Stromrichtungen.

Kontaktfläche 4,12 qcm. Ring rotiert mit v = 9,5 m/Sek.

Stromrichtung	s Amp./qcm	E Volt	w Ohm	Stromrichtung	s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
M. n. K.[1]	1,21	0,39	0,322	M. n. K.	2,42	0,53	0,219
"	0,39	0,25	0,64	"	4,85	0,59	0,122
"	1,36	0,40	0,294	"	7,3	0,65	0,089
"	2,4	0,48	0,200	"	9,7	0,68	0,07
"	4,1	0,56	0,136	K. n. M.	9,7	0,51	0,0525
"	6,1	0,61	0,100	"	7,3	0,48	0,0656
"	7,65	0,66	0,086	M. n. K.	7,3	0,72	0,101
"	9,9	0,72	0,0728	K. n. M.	7,3	0,48	0,0656
"	12,05	0,78	0,065	"	4,85	0,45	0,093
"	14,0	0,82	0,0586	M. n. K.	4,85	0,65	0,134
"	10,2	0,80	0,079	K. n. M.	4,85	0,46	0,0946
"	6,5	0,71	0,109	"	3,4	0,43	0,129
"	3,34	0,55	0,165	M. n. K.	3,4	0,59	0,171
"	0,75	0,35	0,466	"	1,26	0,49	0,39
K. n. M.	0,75	0,26	0,346	K. n. M.	1,26	0,30	0,238
"	2,42	0,35	0,144	M. n. K.	1,23	0,45	0,366
"	5,00	0,41	0,082	"	0,78	0,38	0,49
"	7,3	0,45	0,062	"	0,48	0,30	0,625
"	9,7	0,46	0,0475	"	0,24	0,18	0,75
"	12,2	0,50	0,041	"	0,185	0,15	0,81
"	9,7	0,53	0,055	K. n. M.	0,185	0,11	0,595
"	7,3	0,50	0,069	"	0,097	0,12	1,24
"	4,85	0,44	0,091	M. n. K.	0,097	0,15	1,55
"	2,42	0,35	0,144				

Tabelle 17.

Uebergangswiderstand bei verschiedenen Stromrichtungen.

Ring steht still.

Kohle A. F = 4,12 qcm.

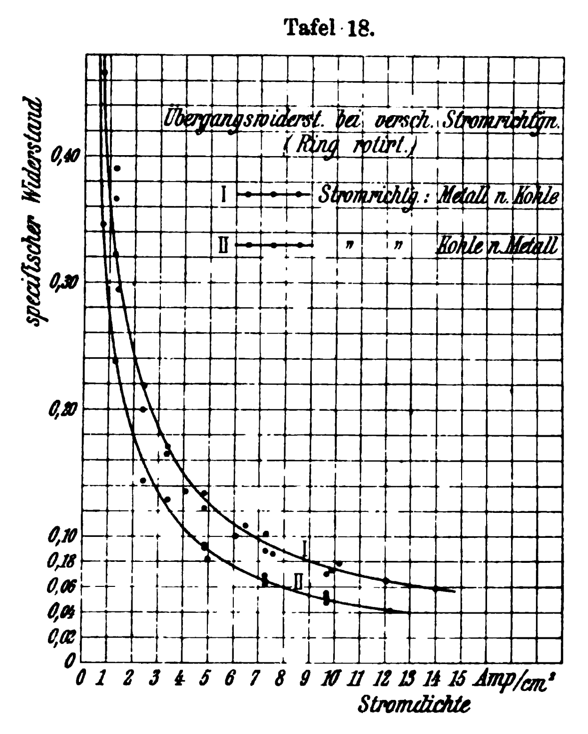
Stromrichtung	s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
M. n. K.	0,97	0,425	0,438
K. n. M.	0,985	0,56	0,57
M. n. K.	0,985	0,43	0,437
"	3,14[2]	0,50	0,159
K. n. M.	3,14	0,56	0,179
M. n. K.	3,14	0,53	0,169
"	3,14	0,61	0,194
K. n. M.	3,14	0,55	0,175
M. n. K.	3,14[2]	0,54	0,172
K. n. M.	3,14	0,60	0,191
M. n. K.	3,14	0,57	0,182
K. n. M.	3,14	0,73	0,232
M. n. K.	3,14	0,60	0,191

Kohle B. F = 4,00 qcm.

Stromrichtung	s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
K. n. M.	1,00	0,68	0,68
M. n. K.	1,01	0,52	0,51
K. n. M.	1,01	0,58	0,57
M. n. K.	3,56[2]	0,82	0,231
K. n. M.	3,56	0,73	0,205
M. n. K.	3,56	1,03	0,290
K. n. M.	3,56	0,74	0,204
M. n. K.	3,56	1,04	0,292
K. n. M.	3,56[2]	0,85	0,239
M. n. K.	3,56	0,79	0,222
K. n. M.	3,56	1,15	0,324
M. n. K.	3,56	0,80	0,225
K. n. M.	3,56	1,16	0,326

[1]) M. n. K = Metall nach Kohle; K. n. M. = Kohle nach Metall.
[2]) Ring wurde vor der Messung etwas gedreht.

Tafel 18.



Kohle. Auch diese Erscheinung wurde auf alle mögliche Weise mit stets gleichem Erfolge nachgeprüft.

Der Ring war bei den Versuchen etwas gebräunt und lief auch nach dem Abschmirgeln stets wieder etwas an, ohne dass Strom hindurchgegangen wäre. Wahrscheinlich wurde diese Färbung durch das weiche, schmierende Material der bei den Versuchen verwandten Kohle veranlasst, indem sich Kohlenteilchen abrieben und auf den Ring und in seinen Poren festsetzten. Die Polarität wurde jedoch auch bei frisch geschmirgeltem, metallisch blankem Ring in gleicher Weise beobachtet.

Um zu untersuchen, ob die Polarität auch bei andern Kohlensorten vorhanden sei, wurden an einer andern Maschine mit einer andern Sorte von Kohlenkontakten noch eine Reihe von Versuchen angestellt, welche in der Hauptsache in Tabelle 16 resp. Tafel 18 wiedergegeben sind. Die Versuchsanordnung war dieselbe wie bei den ersten Versuchen. Der Strom wurde erst allmählich verstärkt und dann wieder geschwächt. Dann wurde die Stromrichtung umgekehrt und derselbe Kreisprozess durchlaufen und dann unter nochmaliger Stromumkehr die ersten Werte nachgeprüft. Zum Schluss wurden noch einige Werte so aufgenommen, dass für jede Stromdichte die Wider-

Tabelle 18.

Ringgeschwindigkeit v = 9 m/Sek.

Kohle A. F = 4,12 qcm. Stromdichte Amp./qcm	Stromrichtung	Spannung vor dem Abwischen	Spannung sofort nach dem Abwischen	Kohle B. F = 4,00 qcm. Stromdichte Amp./qcm	Stromrichtung	Spannung vor dem Abwischen	Spannung sofort nach dem Abwischen
0,73	K. n. M.	0,28	0,36	0,75	M. n. K.	0,53	0,42
0,73	M. n. K.	0,37	0,27	0,75	K. n. M.	0,44	0,75
0,73	"	0,38	0,20	0,75	"	0,42	0,55
0,73	"	0,35	0,22	0,75	"	0,37	0,57
5,0	"	0,58	0,47	5,15	"	0,70	1,07

stände für beide Stromrichtungen direkt nacheinander bestimmt wurden. Die hierbei erhaltenen Widerstandskurven zeigen deutlich, dass die temporären Widerstandsänderungen im Verhältnis zur Polarität zurücktreten und aus dem Endresultat herausfallen. Auch bei ruhendem Ring wurden mit dieser Sorte Messungen vorgenommen (Tabelle 17). Die Ergebnisse stimmen bei beiden Sorten vollständig überein.

Bei den Versuchen wurde noch eine andere eigentümliche Erscheinung bemerkt. Wenn man die bei der Drehung von der Kohle abgeriebenen Kohlenteilchen, welche die Ringoberfläche bedecken, mit einem Tuch abwischte, stieg der Widerstand bei der einen Kohle beträchtlich, während er bei der andern fiel; und zwar stieg jeweils der Widerstand bei der Stromrichtung Kohle nach Metall. Auch dieses Verhalten wurde durch öftere Stromumkehr nachgeprüft. Das Steigen des Widerstands war stärker als das Fallen und die Aenderungen waren so gross, dass die Polarität dadurch umgekehrt wurde, wie aus Tabelle 18 zu ersehen ist, so dass also der Widerstand in der Stromrichtung Kohle nach Metall der grössere wird und wir die gleiche Polarität haben wie bei ruhendem Ring. War der Ring nach dem Abputzen 15 bis 20 Minuten gelaufen, und hatte sich wieder eine neue Kohlenschicht gebildet, so nahm der Widerstand jeweils wieder denselben Wert an, den er bei Beginn des Versuchs vor dem Entfernen der Kohlenteilchen gehabt hatte. Diese Rückbildung ging allmählich, anfangs schneller, dann langsamer vor sich.

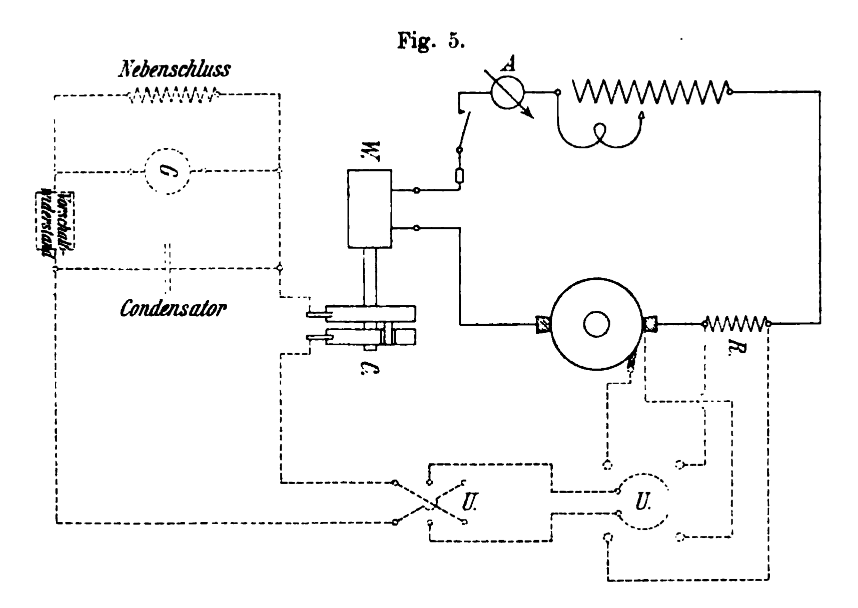
IV. Verhalten des Uebergangswiderstands bei sehr rasch variierender Stromdichte. Der Wechselstromwiderstand.

Der Uebergangswiderstand zwischen Kollektor und Bürsten ist, wie bekannt, von sehr grossem Einfluss bei der Kommutation. Bei

diesem Vorgange treten sehr rasche Aenderungen der Stromdichte unter den Bürsten auf, und es war von vornherein nicht abzusehen, ob der Widerstand auch von so schnell variierender Stromdichte beeinflusst würde. Es wurden daher Messungen über diesen Punkt angestellt, deren hauptsächlichste Resultate hier widergegeben werden sollen.

Die Untersuchungsmethode beruhte auf der raschen Variation der Stromstärke, die der Wechselstrom bietet. Es wurden zusammengehörige Momentanwerte der Stromstärke und des Spannungsabfalls gemessen und die Momentanwerte des Widerstands daraus berechnet. Da es bei diesen Messungen besonders darauf ankam,

Fig. 5.



möglichst gleichmässige Versuchsbedingungen herzustellen und alle Störungen hinwegzuschaffen, wurden auch diese Versuche an Schleifringen ausgeführt und nur anstatt der Gleichstromquelle eine Wechselstrommaschine (W) mit direkt gekuppeltem Kontaktgeber (C) in den Stromkreis eingeschaltet (Schaltungsschema Fig. 5). Die Momentanwerte der Stromstärke wurden an einem induktionsfreien Widerstande (R) gemessen, die Spannungsdrähte wieder unten an der Kohle möglichst nahe der Kontaktstelle und an einem Hilfskontakt angeschlossen, der ebenfalls der Uebergangsstelle möglichst nahe gerückt war. Ausgedehnte Versuche (es handelt sich hier um die Messung sehr kleiner Spannungsdifferenzen, und die Widerstandsunterschiede um den Ringumfang oder sonstige Schwankungen können störend wirken) ergaben,

dass sich ein gut gedämpftes ballistisches Galvanometer in der gezeichneten Schaltung am besten zu diesen Messungen eignet. Die Eichungen wurden mit Gleichstrom vorgenommen und über den ganzen Messbereich ausgedehnt und im Verlauf der Messungen öfter wiederholt.

Zu den Versuchen wurde die weiche Kohlensorte V verwendet. Die Messungen wurden mit Wechselströmen von 13,7 und 18,9 Amp. vorgenommen; da die mit beiden Stromstärken erhaltenen Resultate vollkommen übereinstimmten, wurde auf Aufnahmen mit andern Stromstärken verzichtet. Die aufgenommenen Strom- und Spannungskurven schneiden sich auf der Nulllinie, und die bei ansteigenden und bei fallenden Momentanwerten der Stromstärke aus Spannungsabfall und Stromstärke berechneten Widerstände stimmen vollständig überein; eine Phasenverschiebung ist demnach nicht vorhanden und die direkte Berechnung des Widerstands als Quotient von Spannung und Stromstärke auch hier zulässig. Die Ergebnisse der Messungen sind in den Tabellen 19 bis 22 und auf den Tafeln 19 bis 22 wiedergegeben.

Tabelle 19 (Tafel 19).

Uebergangswiderstand abhängig von rasch variierender Stromdichte bei einer effektiven Stromdichte s_w = 4,42 Amp./qcm.

Kohlensorte V. Kontaktfläche F = 1,42 × 2,18 = 3,10 qcm. Spezifischer Auflagedruck g = 119 g/qcm. Ringgeschwindigkeit v = 6,2 m/Sek. Periodenzahl c = 40.

I. Stromrichtung: Metall nach Kohle.
II. Stromrichtung: Kohle nach Metall.

I.

Momentanwert der Stromstärke i	Momentanwert der Stromdichte σ	Momentanwert des Spannungsabfalls e	Spezifischer Widerstand r
2,28	0,736	0,286	0,388
8,19	2,56	0,723	0,283
3,82	1,23	0,424	0,344
12,9	4,16	0,918	0,220
16,2	5,23	1,036	0,198
14,85	4,8	1,02	0,213
18,7	6,0	1,10	0,184
13,8	4,46	0,94	0,212
8,74	2,82	0,756	0,268
3,05	0,985	0,366	0,372
8,9	2,87	0,731	0,255

II.

Momentanwert der Stromstärke i	Momentanwert der Stromdichte σ	Momentanwert des Spannungsabfalls e	Spezifischer Widerstand r
15,4	4,97	0,91	0,183
16,55	5,35	1,035	0,194
14,45	4,65	0,89	0,191
11,25	3,64	0,724	0,199
10,5	3,39	0,736	0,217
7,7	2,49	0,594	0,238
4,98	1,61	0,515	0,320
8,6	2,78	0,683	0,245
9,8	3,16	0,785	0,249
10,32	3,33	0,73	0,219
3,02	0,976	0,306	0,313
1,72	0,555	0,195	0,351

Tafel 19.

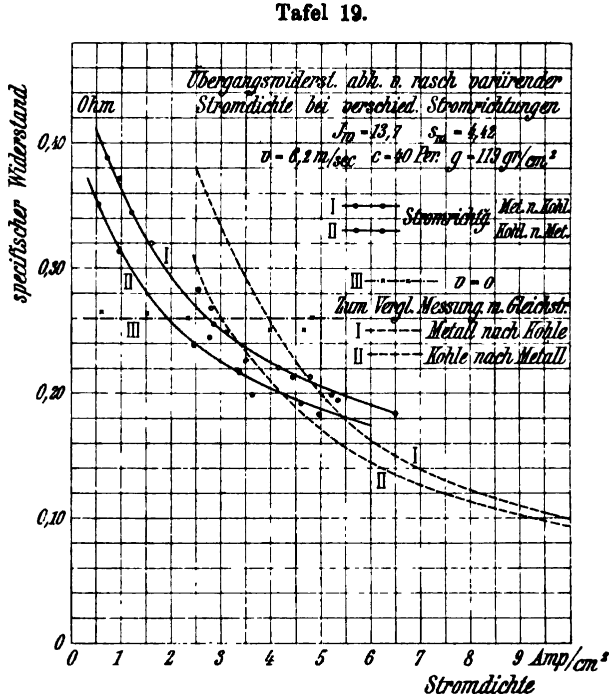


Tabelle 20 (Tafel 20).

Uebergangswiderstand abhängig von rasch variierender Stromdichte bei einer effektiven Stromdichte s_w = 6,15 Amp./qcm.

(Versuchsverhältnisse wie in Tabelle 19 angegeben.)

I. Stromrichtung: Metall nach Kohle.
II. Stromrichtung: Kohle nach Metall.

I.

i Amp.	σ Amp./qcm	e Volt	r Ohm
0,398	0,128	0,0396	0,308
11,6	3,75	0,734	0,195
5,48	1,77	0,452	0,256
25,9	8,35	1,175	0,140
30,4	9,8	1,28	0,131
27,0	8,7	1,19	0,136
21,0	6,76	1,02	0,151
13,9	4,5	0,799	0,178
13,65	4,41	0,806	0,183
0,973	0,314	0,1056	0,346

II.

i Amp.	σ Amp./qcm	e Volt	r Ohm
0,675	0,218	0,0528	0,243
11,3	3,65	0,70	0,192
25,8	8,31	1,025	0,123
30,2	9,74	1,22	0,125
26,9	8,66	1,19	0,137
20,25	6,54	0,99	0,150
14,0	4,52	0,762	0,169
9,66	3,12	0,594	0,190
5,78	1,87	0,41	0,22
2,76	0,89	0,231	0,259
1,22	0,394	0,1065	0,269

Tafel 20.

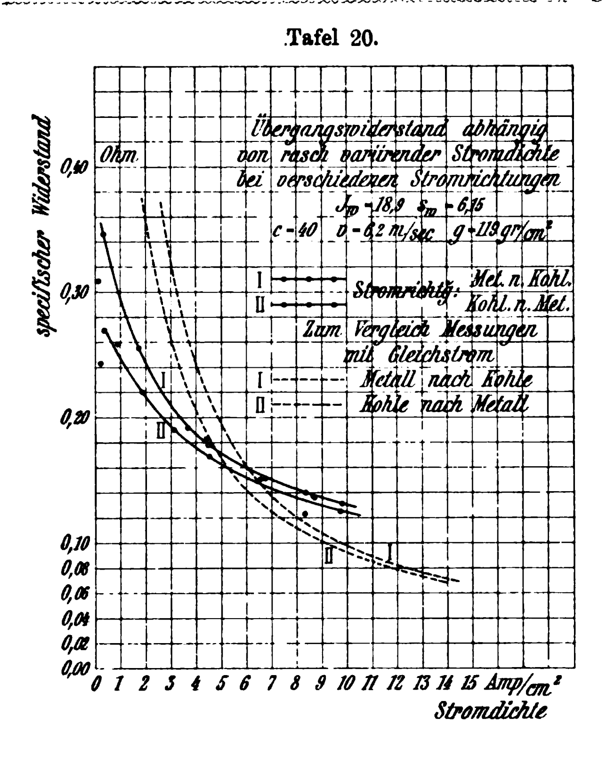


Tabelle 21 (Tafel 21).

Abhängigkeit des Uebergangswiderstands von rasch variierender Stromdichte bei verschiedenen Variationsgeschwindigkeiten (Periodenzahlen).

Effektive Stromdichte s_w = 6,15 Amp. g = 119 g/qcm. v = 6,2 m/Sek.

A. Periodenzahl c = 40 (siehe Tabelle 20, II)
B. „ c = 118
C. „ c = 186

B.

i Amp.	σ Amp./qcm	e Volt	r Ohm
27,7	8,95	1,40	0,157
10,6	3,42	0,69	0,201
2,36	0,76	0,183	0,240
5,64	1,81	0,437	0,241
3,00	0,97	0,232	0,239
20,1	6,5	1,08	0,165

C.

i Amp.	σ Amp./qcm	e Volt	r Ohm
20,5	6,6	1,03	0,157
29,7	9,6	1,175	0,122
5,15	1,66	0,348	0,209
15,5	5,00	0,815	0,163
7,52	2,43	0,495	0,204
3,34	1,08	0,232	0,216

Tafel 21.

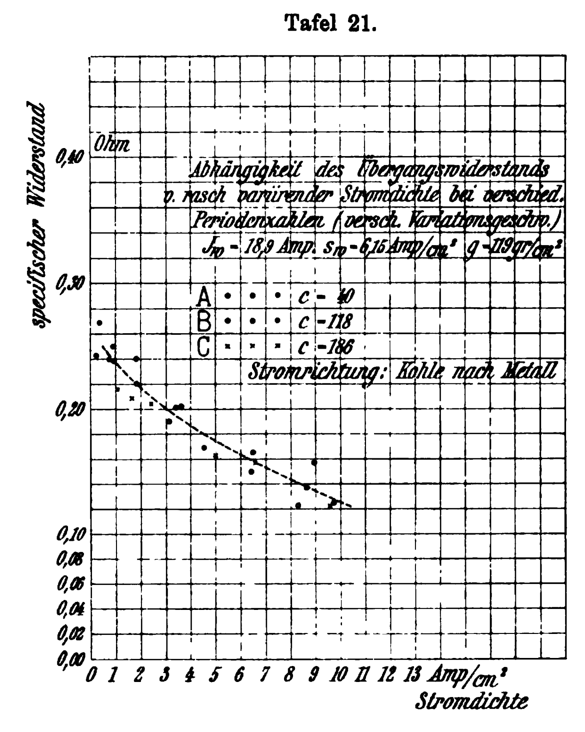


Tabelle 22 (Tafel 22).

Abhängigkeit des Uebergangswiderstands von rasch variierender Stromdichte bei verschiedenen Ringgeschwindigkeiten.

Stromrichtung: Kohle nach Ring. $g = 119$ g/qcm. $c = 40$ Perioden.

A. $s_w = 6,15$ Amp./qcm. $v = 1,81$ m/Sek.

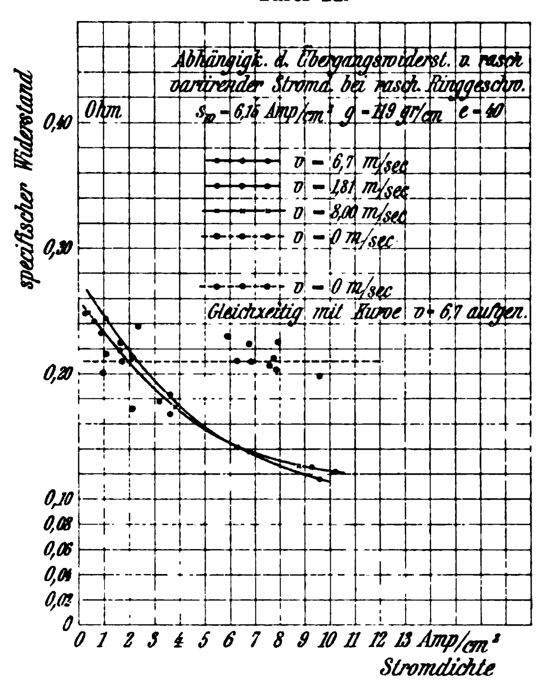
i Amp.	σ Amp./qcm	e Volt	r Ohm
21,0	6,79	0,945	0,139
28,8	9,3	1,175	0,126
31,3	10,1	1,23	0,122
9,9	3,2	0,568	0,178
5,1	1,64	0,359	0,219
0,775	0,25	0,062	0,248
2,76	0,89	0,207	0,233
1,87	0,605	0,162	0,242

B. $s_w = 6,15$ Amp./qcm. $v = 8,00$ m/Sek.

i Amp.	σ Amp./qcm	e Volt	r Ohm
27,1	8,75	1,11	0,127
11,1	3,58	0,62	0,174
1,2	0,39	0,0965	0,249



Tafel 22.



C. $s_w = 6{,}15$ Amp./qcm.
v = 0 m/Sek.

i Amp.	σ Amp./qcm	e Volt	r Ohm
3,03	0,98	0,197	0,201
24,3	7,84	1,59	0,203
24,0	7,75	1,65	0,213
23,5	7,58	1,57	0,207
7,35	2,37	0,565	0,238
18,3	5,9	1,355	0,230
22,9	7,4	1,76	0,226
5,3	1,71	0,359	0,210
21,2	6,85	1,44	0,210
21,0	6,79	1,52	0,224
5,16	1,66	0,373	0,225

D [1]. $s_w = 4{,}42$ Amp./qcm.
v = 0 m/Sek.

i Amp.	σ Amp./qcm	e Volt	r Ohm
7,62	2,35	0,61	0,260
4,74	1,53	0,403	0,264
1,91	0,615	0,163	0,265
12,04	4,0	1,00	0,250
14,5	4,68	1,17	0,250
15,0	4,84	1,26	0,260

[1]) Zu Tafel 19.

E. s_w = 6,15 Amp./qcm. v = 6,7 resp. 0 m/Sek.

i	σ	v = 6,7		v = 0	
		e	r	e	r
Amp.	Amp./qcm	Volt	Ohm	Volt	Ohm
19,5	6,3	0,895	0,142	1,32	0,21
11,2	3,62	0,665	0,184	0,61	0,168
6,65	2,15	0,46	0,213	0,37	0,172
3,36	1,09	0,266	0,244	0,236	0,216
29,8	9,6	1,11	0,118	1,9	0,198

Die Versuche ergaben sämtlich, dass bei rotierendem Ring der Uebergangswiderstand auch bei sehr rascher Variation von der Stromdichte abhängig ist. Diese Abhängigkeit zeigte sich noch bei einer Periodenzahl von 186 Perioden, der höchsten, die für die Messung zur Verfügung stand. Die Stromdichte steigt dabei in $^1/_{744}$ Sekunde von Null zu ihrem Maximalwert an. Diese Variationsgeschwindigkeit ist etwa von derselben Grössenordnung, wie sie auch bei der Kommutation in Betracht kommt. Die Zeitdauer einer Periode ist dort gleich der Zeit, in der sich der Kollektor um eine Lamellenbreite dreht, für eine Lamellenbreite von 0,01 m und eine Umfangsgeschwindigkeit von 10 m/Sek. demnach gleich $^1/_{1000}$ Sekunde. Da bei Messungen mit 40, 118, 186 Perioden (Tabelle 21, Tafel 21) kein sehr merklicher Unterschied im Verhalten des Widerstands hervortrat, kann man annehmen, dass dieser von der Periodenzahl annähernd unabhängig ist und bei Verwertung der Resultate dieselbe unberücksichtigt lassen.

Bei Aufzeichnung der Kurven des Widerstands als Funktion der momentanen Stromdichte ergab sich ferner, dass man deutlich zwei Kurven erhält (Tafeln 19 und 20). Die Widerstände sind verschieden, je nachdem sie bei der einen oder bei der andern Richtung des Wechselstroms aufgenommen sind. Es zeigte sich also hier die Polarität, welche zu den im Kap. III behandelten Versuchen führte und durch diese bestätigt wurde. Für das Folgende soll jedoch von dieser Erscheinung abgesehen und nur Mittelwerte in Betracht gezogen werden.

Während die Art der Variation des Widerstands für beide effektiven Stromstärken vollständig gleich war, ist seine absolute Grösse in beiden Fällen verschieden. Sie ist von der effektiven Stromdichte

$$\frac{J_{eff}}{F} = s_w = \sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} \sigma_t^2 . dt}$$

$\left(\frac{1}{T} = \text{Periodenzahl}, \ \sigma_t = \text{Momentanwert der Stromdichte}\right)$ bedingt und es ergibt sich die interessante Thatsache, dass die mit Wechselstrom aufgenommenen Kurven der Widerstandsvariationen mit der Stromdichte von den mit Gleichstrom aufgenommenen bei der effektiven Stromdichte des Wechselstroms geschnitten werden[1]) und der Uebergangswiderstand bei den verschiedenen Momentanwerten des Wechselstroms um den durch die effektive Stromstärke bedingten Mittelwert hin und her pendelt. Der Momentanwert des Widerstands für rasch variierende Stromdichte ist demnach erstens durch die effektive Stromdichte $\sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} \sigma_t^2 . dt}$ und zweitens durch deren Momentanwert σ_t bestimmt.

Um den Einfluss der Ringgeschwindigkeit auf diese Widerstandsvariation festzustellen, wurden Versuche bei Ringgeschwindigkeiten von 1,8, 6,7 und 8,00 m/Sek. gemacht (Tabelle 22, Tafel 22), welche ergaben, dass der Widerstand von der Geschwindigkeit bei rotierendem Ring annähernd unabhängig ist und diese auch auf die Variation mit der Stromdichte keinen Einfluss hat. Dagegen zeigte sich die merkwürdige Erscheinung, dass der Widerstand bei ruhendem Ring von der rasch variierenden Stromdichte unabhängig ist. Die Werte Tabelle 22, C und D sind aufgenommen, während die Kohle stets an der gleichen Stelle des Rings stand (für eine Versuchsreihe). Die kleinen Variationen erklären sich dadurch, dass bei ruhendem Ring der Widerstand durch die kleinsten Erschütterungen geändert wird. Man sieht jedoch, dass die momentane Stromdichte auf diese unregelmässigen Variationen keinen Einfluss hat. Das Konstantbleiben des Widerstands gibt sich namentlich auch dadurch zu erkennen, dass für höhere Momentanwerte der Stromdichte der Widerstand für ruhenden Ring viel grösser ist, als für rotierenden. Dies zeigte sich auch deutlich bei einem Versuch, der mit Rücksicht darauf angestellt wurde. Der Widerstand wurde bei rotierendem Ring für eine bestimmte Stellung des Kontaktgebers, also einen gegebenen Momentanwert der

---

[1]) Siehe Tafel 19 und 20.

Stromstärke bestimmt und dann der Antriebsmotor des Ringes ausgeschaltet, so dass dieser allmählich zur Ruhe kam. Stellte man den Kontaktgeber auf einen hohen Momentanwert der Stromdichte ein, so zeigte sich der Widerstand während des Auslaufens annähernd konstant, fing aber, nachdem der Ring zur Ruhe gekommen war, sofort an zu steigen. Dieses Verhalten zeigte sich bei sämtlichen diesbezüglichen Versuchen und in verschiedenen Ruhelagen des Rings. Eine dieser Messungen ist in Tabelle 22, E wiedergegeben. Die unregelmässigen Abweichungen rühren hier hauptsächlich davon her, dass der Ring in verschiedenen Lagen zur Ruhe kam und der Uebergangswiderstand stets an verschiedenen Stellen des Ringumfangs differiert. Der Unterschied zwischen Bewegung und Ruhe wurde noch bei Auslauf von Ringgeschwindigkeiten von 0,26 m/Sek. aus deutlich konstatiert.

Um die erwähnte Abhängigkeit des Widerstands von der effektiven Stromdichte genauer nachzuprüfen, wurden zum Abschluss der experimentellen Untersuchungen noch Messungen über den Wechselstromwiderstand der Kontaktstelle vorgenommen. Da sich bei Aufnahme der Strom- und Spannungskurven gezeigt hatte, dass an der Kontaktstelle keine Phasenverschiebung vorhanden ist, wurde der Uebergangswiderstand für Wechselstrom direkt als Quotient der Effektivwerte von Spannung und Stromstärke berechnet. Die Kohlen waren auf einen Ring aufgesetzt, auf welchem ausserdem eine kleine Kontaktbürste zur Spannungsmessung schleifte. Es wurde ein Wechselstrom von 165 Perioden durch die Bürsten geschickt; ausserdem konnte auch Gleichstrom eingeleitet werden. Es wurde nun für verschiedene Stromdichten der Widerstand für Gleichstrom in beiden Richtungen und für Wechselstrom durch Strom- und Spannungsmessung ermittelt. Der effektive Spannungsabfall an der Kontaktstelle bei Durchgang von Wechselstrom wurde mit einem Spiegeldynamometer gemessen, die Stromstärke mit einem Hitzdraht-Ampèremeter.

Die Versuchsresultate sind in Tabelle 23 und auf Tafel 23 zusammengestellt. Es sind die für jede der beiden Kohlen, welche bei der Messung benutzt wurden, gefundenen Werte angegeben; dass der Widerstand der einen Kohle grösser ist, als der der andern, rührt von der Verschiedenheit des Auflagedrucks her; vielleicht lag auch die eine Kohle nicht vollständig auf. Auf das Ergebnis der Versuche hat dieser Umstand jedoch keinen Einfluss. Bei Stromdichten von unter 2 Amp./qcm wurden die Dynamometerausschläge zu klein, um genaue Ablesungen zuzulassen, und ein Instrument mit grösserer Empfindlichkeit war nicht vorhanden. Die für höhere Stromdichten

Tafel 23.

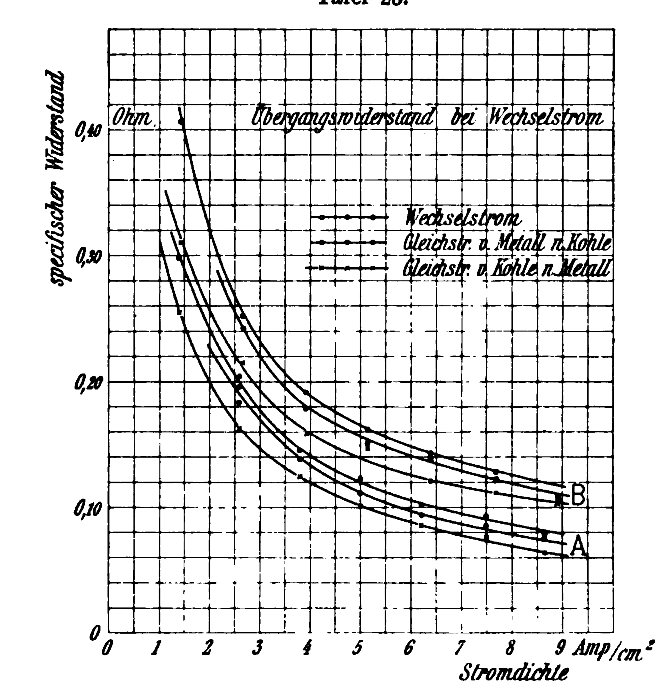


Tabelle 23 (Tafel 23).

Uebergangswiderstand bei Wechselstrom.

Kohle A. Kontaktfläche F = 4,12 qcm.
Kohle B. Kontaktfläche F = 4,00 „

Kohle A.

Stromdichte	Wechselstrom		Gleichstrom			
	Effektiver Spannungsabfall	Widerstand	Spannungsabfall		Widerstand	
			M. n. K.	K. n. M.	M. n. K.	K. n. M.
Amp./qcm	Volt	Ohm	Volt	Volt	Ohm	Ohm
2,6	0,51	0,196	0,53	0,42	0,204	0,162
3,8	0,525	0,138	0,55	0,47	0,145	0,124
5,0	0,55	0,11	0,61	0,50	0,122	0,100
6,22	0,575	0,0925	0,63	0,53	0,101	0,0852
7,5	0,63	0,084	0,69	0,56	0,092	0,0748
8,76	0,65	0,075	0,68	0,54	0,0785	0,0623
2,62	0,48	0,183	—	—	—	—

Kohle B.

Strom-dichte	Wechselstrom		Gleichstrom			
	Effektiver Spannungs-abfall	Wider-stand	Spannungsabfall		Widerstand	
			M. n. K.	K. n. M.	M. n. K.	K. n. M.
Amp./qcm	Volt	Ohm	Volt	Volt	Ohm	Ohm
2,68	0,65	0,242	0,675	0,575	0,252	0,215
3,93	0,70	0,178	0,75	0,62	0,191	0,158
5,15	0,77	0,150	0,83	0,75	0,161	0,146
6,4	0,88	0,138	0,91	0,77	0,142	0,120
7,7	0,93	0,121	0,96	0,85	0,125	0,110
8,92	0,95	0,1065	0,96	0,90	0,108	0,101
2,7	0,655	0,242	—	—	—	—

erhaltenen Werte genügen jedoch vollständig, um das Verhalten des Uebergangswiderstands zu erkennen. Es ergibt sich, dass der Widerstand für Wechselstrom etwa gleich dem Mittelwert des Widerstands für Gleichstrom beider Stromrichtungen ist. Inwiefern hierdurch die Versuchsresultate, welche durch die Aufnahme der Wechselstromkurven erhalten worden waren, bestätigt und verallgemeinert werden, soll erst im folgenden Kapitel dargelegt werden.

V. Anwendungen der Versuchsergebnisse.

1. Berechnung des Spannungsabfalls unter den Bürsten. Es erübrigt nun noch, die bisher gegebenen Versuchsresultate in einfache Formen zu bringen, so dass dieselben für die Anwendung geeigneter und handlicher werden.

Für genauere Rechnungen kann man sich der aufgenommenen Kurven bedienen oder auch für dieselben Gleichungen aufstellen. Die Abhängigkeit des Uebergangswiderstands pro Quadratcentimeter von der Stromdichte lässt sich am genauesten durch die Gleichungen

$$w = \frac{A}{s^B} \quad \text{oder} \quad w = \frac{A}{s + B} + C,$$

wo A, B, C Konstante sind, darstellen. Für Stromdichten über 2 Amp./qcm geben die Formeln

$$w = \frac{A}{s + B} \quad \text{und} \quad w = \frac{A}{s} + B$$

gute Annäherungen, von denen namentlich die letzte in der Anwendung recht bequem ist[1]).

Mit grosser Genauigkeit zu rechnen hat jedoch bei dem vorliegenden Fall keinen Wert, da der Uebergangswiderstand, wie in der Einleitung ausgeführt wurde, ausser der Stromdichte noch von einer ganzen Reihe von Faktoren beeinflusst wird, und diese sich auf keinen Fall alle berücksichtigen lassen. Infolge davon können die Versuchsergebnisse mit einer Kohlensorte immer nur mit gewisser Annäherung allgemein für diese Sorte verwendet werden. Es sei nur daran erinnert, dass, sowie der Kollektor nicht genau rund läuft und Schwingungen der Bürsten auftreten, erhebliche Variationen des Widerstands gegenüber ruhigem Lauf entstehen, welche sich natürlich niemals vorher bestimmen lassen. Es wird daher genügen, für jede Sorte Mittelwerte zu finden, welche gewisse Anhaltspunkte geben und überschlägliche Berechnungen gestatten. Aus diesem Grunde wird man auch die Messungen an Ringen annähernd für Kollektoren als gültig annehmen können, allenfalls kann man eine kleine Erhöhung der Werte vornehmen.

Es hat sich nun bei den Versuchen mit Gleichstrom herausgestellt, dass von Stromdichten von etwa 2 Amp./qcm an der Spannungsabfall unter den Bürsten für alle Belastungen annähernd konstant bleibt, der Widerstand demnach der Stromdichte umgekehrt proportional ist. Man kann daher für die einzelnen Bürstensorten Mittelwerte des Spannungsabfalls aufstellen. Dieselben sind je nach der Härte des Bürstenmaterials verschieden. Es wurden als Werte des Spannungsabfalls E gefunden:

für sehr harte Kohlen . . .	E = 1,2	bis	1,5	Volt,
„ harte Kohlen	E = 1,1	„	1,2	„
„ weiche Kohlen	E = 0,7	„	1,0	„
„ sehr weiche Kohlen . . .	E = 0,45	„	0,6	„

je nach dem Auflagedruck.

Man kann diesen Spannungsabfall für jede Sorte leicht ermitteln, wobei jedoch stets zu beachten ist, dass die Messungen nur bei um-

[1]) Zur Ermittelung der Konstanten in dieser Gleichung benutzt man am einfachsten folgendes Verfahren: Durch eine kleine Umformung $w = \frac{A}{s} + B$, $w \cdot s - B \cdot s = A$ erhält man, da $w \cdot s = E$, $E - B \cdot s = A$, die Gleichung einer Geraden. Man trägt nun die Werte des Spannungsabfalls E, welche man gemessen hat, als Funktion von s in ein Koordinatensystem ein und erhält in dem Abschnitt auf der E-Achse A und als Tangente des Neigungswinkels der Geraden B.

laufenden Stromabnehmern vorgenommen werden dürfen, da sich sonst unrichtige Werte ergeben. Auch sollten die Versuche an möglichst rundlaufenden Kollektoren oder Ringen vorgenommen werden, da sonst die Bürstenschwingungen, deren Einfluss ja in jedem speziellen Fall wieder gänzlich verschieden sein kann, Fehler in das Resultat bringen können. Ist die Härte der Kohle nicht bekannt, so kann man für die gewöhnlichen Sorten bei überschläglichen Rechnungen vielleicht den Spannungsabfall von 1 Volt als Mittelwert annehmen. Der spezifische Uebergangswiderstand wird dann gleich dem reziproken Wert der Stromdichte, der Gesamtwiderstand einer Bürste gleich der reziproken Stromstärke. Die Werte, welche diese Faustregel ergibt, sind in Tafel 17 als Kurve XI eingetragen.

2. Uebergangswiderstand und Kommutation. Wie am Eingang von Kapitel IV erwähnt ist, wurden die dort beschriebenen Versuche mit Wechselstrom speziell mit Rücksicht auf die Kommutation vorgenommen. Wenn wir nun die Resultate jener Messungen auf diesen Vorgang anwenden, sind wir uns wohl bewusst, dass die Verhältnisse, welche hier in Betracht kommen, mit den Bedingungen, unter welchen die Versuchsergebnisse gewonnen wurden, nicht exakt übereinstimmen. Immerhin lassen sich jedoch Anhaltspunkte gewinnen. Die folgenden Betrachtungen sollen also nur ein annäherndes Bild geben von dem Einfluss, welchen die durch die Versuche festgestellten Widerstandsänderungen bei der Kommutation ausüben.

Die Abhängigkeit des spezifischen Uebergangswiderstands (r) von der rasch variierenden Stromdichte (σ) lässt sich durch die Gleichung ausdrücken:

$$r = \frac{M}{\sigma} + N,$$

wobei M und N von der effektiven Stromdichte

$$\frac{J_w}{F} = \sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} \sigma_t^2 . dt}$$

abhängige Konstanten bedeuten. Diese Formel gilt mit recht guter Annäherung von 1 Amp./qcm an; unter 1 Amp. liefert sie etwas zu hohe Werte. Eine mathematische Untersuchung zeigte jedoch, dass die Abweichungen vernachlässigt werden können.

Man kann nun diese Funktion $r = f(\sigma)$ in die von Prof. E. Arnold und Dr. G. Mie in der E.T.Z. 1899, Heft 5 gegebene Behand-

lung der Funkenbildung einführen. Der gesamte Uebergangswiderstand R einer Kontaktfläche F beträgt

$$R = \frac{r}{F} = \frac{M}{J} + \frac{N}{F}.$$

Die Kontaktflächen der beiden dort betrachteten Lamellen 1 und 2 sind

$$f_1 = F \cdot \frac{T - t}{T},$$

$$f_2 = F \cdot \frac{t}{T},$$

wobei unter F die Kontaktfläche sämtlicher auf einem Stift sitzenden Bürsten, unter T die Zeitdauer des Kurzschlusses einer Spule und unter t die Zeit vom Beginn des Kurzschlusses an verstanden ist.

Hieraus ergibt sich der Widerstand gegen die ablaufende Lamelle

$$r_1 = \frac{M}{i_1} + \frac{N}{f_1} = \frac{M}{J + i} + \frac{N}{F} \cdot \frac{T}{T - t}$$

(i_1 = Stromstärke der ablaufenden Lamelle = J + i,
J = Stromstärke eines Armaturstromzweiges,
i = Stromstärke der kurzgeschlossenen Spule zur Zeit t)

und der Widerstand gegen die auflaufende Lamelle

$$r_2 = \frac{M}{i_2} + \frac{N}{f_2} = \frac{M}{J - i} + \frac{N}{F} \cdot \frac{T}{t}.$$

Führt man diese Werte in die allgemeine Gleichung der Kommutation (Gleichung 3, E.T.Z. 1899, S. 98)

$$L \cdot \frac{di}{dt} + f(t) + R \cdot i + \frac{R_1 \cdot T}{T - t}(J + i) - R_1 \cdot \frac{T}{t}(J - i) = 0$$

ein, so erhält man

$$L \cdot \frac{di}{dt} + f(t) + R i + \left(\frac{M}{J + i} + \frac{N}{F} \cdot \frac{T}{T - t}\right)(J + i)$$
$$- \left(\frac{M}{J - i} + \frac{N}{F} \cdot \frac{T}{t}\right)(J - i) = 0,$$

$$L \cdot \frac{di}{dt} + f(t) + R \cdot i + M + \frac{N}{F} \cdot \frac{T}{T - t} \cdot (J + i) - M - \frac{N}{F} \cdot \frac{T}{t}(J - i) = 0.$$

M hebt sich also heraus und die Gleichung ist wieder in die ursprüngliche Form zurückgeführt, nur dass an Stelle des dort genannten R_1 $\frac{N}{F}$ getreten ist.

Der Uebergangswiderstand zerfällt durch die Einkleidung in die oben genannte Gleichung $r = \frac{M}{\sigma} + N$ gewissermassen in zwei Teile, einen konstanten N und einen mit der Stromdichte variablen $\frac{M}{\sigma}$. Der durch den variablen Teil bewirkte Spannungsabfall ist bei beiden Lamellen gleich und hebt sich auf; man braucht also bei der weiteren Rechnung denselben nicht zu berücksichtigen und sämtliche Resultate bleiben unverändert, nur tritt überall an Stelle von R_1 $\frac{N}{F}$.

Es handelt sich also noch um Feststellung der Grösse N. Die am Ende von Kapitel IV beschriebenen Versuche über den Wechselstromwiderstand haben nun ergeben, dass dieser gleich dem Gleichstromwiderstand und also auch in gleicher Weise wie dieser von der Stromdichte abhängig ist. Inwiefern sich dies in der Grösse des Gliedes N der Gleichung $r = \frac{M}{\sigma} + N$ äussern muss, mag folgende Ueberlegung zeigen:

Mit Hilfe der angeführten Gleichung kann man für jede effektive Stromdichte s_{eff}, wenn M und N für sie gegeben sind, den Wechselstromwiderstand pro Quadratcentimeter w_w berechnen:

$$w_w = \frac{E_{eff}}{J_{eff}} \cdot F = \frac{E_{eff}}{s_{eff}} = \frac{\sqrt{\frac{2}{T} \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} e_t^2 \, . \, dt}}{s_{eff}},$$

$$e_t = i_t \cdot \frac{r_t}{F} = \sigma_t \cdot r_t = \sigma_t \left(\frac{M}{\sigma_t} + N\right) = M + N \cdot \sigma_t,$$

$$\int_0^{\frac{T}{2}} e_t^2 \, dt = \int_0^{\frac{T}{2}} (M + N \cdot \sigma_t)^2 \, . \, dt$$

$$= \frac{T}{2} \cdot \left(M^2 + N^2 \cdot \sigma_{eff}^2 + 2M \cdot N \cdot \sigma_{eff} \cdot \frac{\sigma_{mittel}}{\sigma_{eff}}\right).$$

Diese Integration gilt für beliebige Kurvenform des Wechselstroms. Man wird nun, da das Glied $2MN \cdot \sigma_{eff} \cdot \frac{\sigma_{mittel}}{\sigma_{eff}}$ auf das Resultat nur

geringen Einfluss hat, den reziproken Formfaktor $\frac{\sigma_{mittel}}{\sigma_{eff}}$ ohne grossen Fehler gleich 1 setzen dürfen. Dann erhält man

$$\int_0^{\frac{T}{2}} (M + N \cdot \sigma_t)^2 \cdot dt = \frac{T}{2} \cdot (M + N \cdot \sigma_{eff})^2,$$

und der spezifische Wechselstromwiderstand wird gleich

$$w_w = \frac{M + N \cdot \sigma_{eff}}{s_{eff}}.$$

Da s_{eff} und σ_{eff} numerisch gleich sind, ergibt sich als Endresultat

$$w_w = \frac{M}{\sigma_{eff}} + N,$$

wobei M und N Werte sind, die für jeden Effektivwert der Stromdichte verschieden sein können.

Aus diesem Resultate folgt, dass der spezifische Wechselstromwiderstand $w_w = \frac{E_{eff}}{J_{eff}} \cdot F$, der sich aus der Messung der Effektivwerte von Spannungsabfall und Stromstärke ergibt, annähernd gleich dem Widerstand sein muss, der bei der Aufnahme von Strom- und Spannungskurven für den Momentanwert der Stromdichte σ_{eff} gefunden wurde. Da nun der Wechselstromwiderstand mit dem Gleichstromwiderstand übereinstimmt, müssen sich die Widerstandskurven für rasche Variation der Stromdichte mit den Gleichstromkurven bei der effektiven Stromdichte schneiden, wie es ja auch die Versuche gezeigt haben (Tafel 19 und 20).

Wir können nun die Ergebnisse der Messungen mit Gleichstrom hier anwenden und für höhere Stromdichten den effektiven Spannungsabfall $E_{eff} = w_w \cdot s_{eff}$ konstant setzen. Wir erhalten dann

$$w_w \cdot s_{eff} = M + N \cdot \sigma_{eff} = \text{Konstant},$$
$$N \cdot \sigma_{eff} = \text{Konstante} - M.$$

Wie bereits erwähnt, ist N ein von den Momentanwerten der Stromdichte unabhängiger Wert, dem sich der Widerstand für höhere Stromdichten asymptotisch nähert; $N \cdot \sigma_{eff}$ ist der Spannungsabfall, den dieser Teil hervorruft. $\frac{M}{\sigma}$ ist der mit der Stromdichte variable Teil des Widerstands, welcher einen für jeden Effektivwert derselben konstanten Spannungsabfall M bewirkt. Dieser letztere tritt jedoch gegen

den erst erwähnten zurück; eine Aenderung von M für verschiedene effektive Stromdichten wird daher das Resultat verhältnismässig wenig beeinflussen und man kann $N . \sigma_{eff}$ annähernd konstant setzen. Die Thatsache, dass die Momentanwerte des Widerstands bei rasch variierender Stromdichte auch von der effektiven Stromdichte bedingt werden, wird sich also hauptsächlich durch eine Veränderung von N mit der effektiven Stromdichte zeigen und diese Grössen werden einander annähernd umgekehrt proportional sein.

Dieses Verhalten können wir auch deutlich aus den Gleichungen ersehen, welche die Versuche ergeben haben. Die Messungen wurden bei effektiven Stromdichten von 4,42 und 6,1 Amp./qcm vorgenommen. Für $s_{eff} = 4,42$ ist im Mittel für beide Stromrichtungen

$$r = \frac{0,17}{\sigma} + 0,166,$$

für $s_{eff} = 6,1$ Amp./qcm

$$r = \frac{0,2}{\sigma} + 0,122.$$

Im ersten Falle erhalten wir

$$N . s_{eff} = 0,166 . 4,42 = 0,734,$$

im zweiten Falle

$$N . s_{eff} = 0,122 . 6,1 = 0,745.$$

Nun ist die Ermittlung der Grösse $N . s_{eff}$ ziemlich umständlich, während sich der Spannungsabfall für Gleichstrom viel leichter ermitteln lässt. Dieser letztere ist um das Glied M grösser als $N . s_{eff}$, welches in den angeführten Gleichungen nur etwa den vierten Teil von $N . s_{eff}$ beträgt; es wird daher in vielen Fällen erlaubt sein, unter Vernachlässigung des Gliedes M einfach mit dem für Gleichstrom gefundenen Spannungsabfall zu rechnen.

VI. Ursachen der Widerstandsänderung.

Es ergeben sich, wie man sieht, beim Stromübergang zwischen Kohlenkontakten und Stromabnehmern eine ganze Reihe merkwürdiger Erscheinungen und Eigenschaften des Uebergangswiderstands. Bei einem Versuch, dieselben zu erklären, liegt es nahe, zuvörderst an Wärmewirkungen zu denken, und das Sinken des Widerstands einem negativen Temperaturkoëffizienten zuzuschreiben. An der Uebergangsstelle befindet sich ein Gemisch von Kohlenteilchen und Metalloxyd; im allgemeinen wird auch die Ringoberfläche eine leichte Oxydschicht

tragen. Wir haben demnach hier lauter Stoffe von geringer Leitfähigkeit und negativem Temperaturkoëffizienten [1]), und es ist wohl zu erwarten, dass mit steigender Temperatur der Widerstand fallen wird.

An der Uebergangsstelle wird die Stromenergie und der Reibungseffekt in Wärme umgewandelt. Ferner hat jeder unter die Kohle gelangende Teil der Ringoberfläche eine bestimmte Temperatur und diese wird beim Passieren der Kontaktstelle um einen gewissen Betrag erhöht, welcher der in diesem Augenblick in Wärme umgewandelten Energiemenge entspricht. Nachdem dann das Ringelement die Kohle verlassen hat, wird es einen Teil seiner Wärme abgeben, bis es wieder unter eine Kontaktstelle gelangt. Unter dem Einfluss von Abkühlung und Erwärmung wird sich daher für jeden zugeführten Arbeitsbetrag eine bestimmte Ringtemperatur einstellen, die jedoch an den einzelnen Stellen des Ringumfangs etwas variiert; am niedrigsten ist sie an der Stelle des Rings, die jeweils gerade vor der Kohle steht, am höchsten unter der Kohle selbst. Die Temperatur der Uebergangsstelle hängt demnach ab erstens von der Ringtemperatur und zweitens von der in jedem Augenblick an der Kontaktstelle in Wärme umgesetzten Arbeit.

Hierdurch erklärt sich die in Kapitel II geschilderte Erscheinung, dass bei Aenderung der Stromdichte der Widerstand, welcher sich sofort nach Einstellung einer neuen Stromdichte ergibt, von der vorhergehenden abhängig ist. Geht man von einer hohen Stromdichte zu einer niederen über, so ist die Ringtemperatur anfangs grösser, als der niederen Stromdichte entspricht; der Ring wird sich aber allmählich abkühlen; der Widerstand wird daher anfangs kleiner sein und dann langsam steigen. Das Umgekehrte wird beim Uebergang von niederen Stromdichten zu höheren eintreten; der Widerstand wird demnach hier fallen. Auch das allmähliche Sinken des Widerstands nach dem Anlassen der Maschine erklärt sich durch Wärmewirkungen, da die Temperatur von Ring und Kohle nach dem Anlaufen infolge der Reibung steigt. Hauptsächlich aber spricht der Umstand, dass der Widerstand für Wechselstrom und Gleichstrom das gleiche Verhalten zeigt und für gleiche effektive Stromdichte übereinstimmt dafür, dass hier Wärmewirkungen eine Rolle spielen, da gerade die entwickelte Wärmemenge für beide Stromarten gleich ist. Bei rascher Variation werden wir an der Uebergangsstelle ebenfalls Variationen der Temperatur mit der Stromdichte haben, wie man aus dem analogen Verhalten des Wechselstromlichtbogens schliessen kann, bei dem ja diese

[1]) Temperaturkoëffizienten von Metalloxyden. E.T.Z. 1900, S. 675.

Temperaturschwankungen direkt an den Aenderungen der Lichtintensität wahrgenommen werden können.

Auf Grund dieser Beobachtungen wird man wohl annehmen dürfen, dass ein Teil der Variationen des Uebergangswiderstands auf Aenderungen der Temperatur der Uebergangsstelle zurückzuführen ist. Jedoch genügen diese nicht, um das Verhalten desselben vollständig zu erklären. Hierfür erscheint besonders der Grund ausschlaggebend, dass die Abhängigkeit des Widerstands auch noch bei so kleinen Stromdichten auftritt, dass hier eine entsprechende Aenderung der Temperatur ausgeschlossen erscheint. Die durch die Reibung erzeugte Wärme überwiegt nämlich hier vollständig und wird die Temperatur bestimmen. Die kleinen Aenderungen derselben, die von der Variation der Stromarbeit herrühren, können keinen Einfluss ausüben. Auf Tafel 24 sind die Ergebnisse von Messungen mit sehr kleinen Stromdichten aufgetragen und in Tabelle 24 die zugehörigen Daten gegeben und jeweils auch die entsprechende Stromwärme absolut und in Prozenten des Reibungseffekts angegeben.

Tabelle 24 (Tafel 24).

Kohlensorte V.

Kohle A. G = 0,369 kg. F = 3,10 qcm. v = 6,2.
Kohle B. G = 0,495 „ F = 3,10 „ v = 6,2.

Reibungseffekt A. $R_A = 9{,}81\ G\,.\,v\,.\,\rho = 9{,}81\,.\,0{,}369\,.\,6{,}2\,.\,0{,}2$ Watt $= 4{,}5$ Watt.
Reibungseffekt B. $R_B = 9{,}81\,.\,0{,}495\,.\,6{,}2\,.\,0{,}2$ Watt $= 6{,}0$ Watt.

I. Stromrichtung: Metall nach Kohle.
II. Stromrichtung: Kohle nach Metall.

Kohle A.

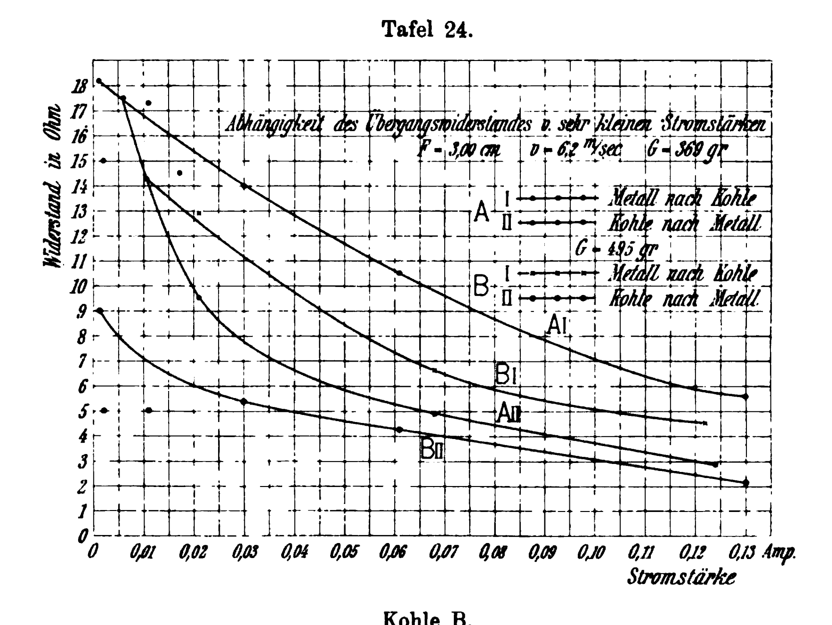
I.

J Amp.	E Volt	W Ohm	Stromwärme J^2W absolut	Stromwärme J^2W in % von R
0,13	0,72	5,53	0,0815	1,8
0,061	0,64	10,5	0,039	0,85
0,030	0,42	14,0	0,0126	0,28
0,0172	0,25	14,5	0,0043	0,096
0,011	0,19	17,3	0,00209	0,046
0,002	0,03	15,0	0,00006	0,013
0.0011	0,02	18,2	0,000022	0,00049

II.

J Amp.	E Volt	W Ohm	Stromwärme J^2W absolut	Stromwärme J^2W in % von R
0,006	0,105	17,5	0,00063	0,014
0,0105	0,15	14,3	0,00157	0,035
0,021	0,20	9,5	0,0042	0,093
0,068	0,33	4,85	0,0225	0,5
0,124	0,35	2,82	0,0436	0,96

Tafel 24.



Kohle B.

I.

J Amp.	E Volt	W Ohm	Stromwärme J^2W absolut	Stromwärme J^2W in % von R
0,006	0,07	11,6	0,000042	0,0007
0,0105	0,15	14,3	0,00157	0,0262
0,021	0,27	12,8	0,00566	0,0945
0,068	0,45	6,6	0,0306	0,51
0,124	0,57	4,5	0,0706	1,18

II.

J Amp.	E Volt	W Ohm	Stromwärme J^2W absolut	Stromwärme J^2W in % von R
0,13	0,275	2,11	0,0358	0,6
0,061	0,26	4,26	0,0159	0,266
0,030	0,16	5,34	0,0048	0,08
0,0172	0,10	5,81	0,0017	0,0283
0,011	0,055	5,00	0.000605	0,0101
0,002	0,01	5,00	0,00002	0,00033
0,0011	0,01	9,1	0,000011	0,00018

Das Verhalten des Uebergangswiderstands lässt sich demnach allein durch Wärmewirkungen nicht erklären; es muss ausserdem noch ein anderer Einfluss wirksam sein. Aus den bisherigen Versuchen lässt sich jedoch über die Art dieser Einwirkung kein einheitliches, widerspruchloses Bild gewinnen.

Zum Schlusse seien noch einige Fälle erwähnt, bei denen der Widerstand in verschiedener Hinsicht analoges Verhalten, wie das betrachtete, zeigt. So verhält sich der Widerstand von dünnen Schichten dielektrischer Substanzen ganz ähnlich wie der Kontaktwiderstand.

(Walter Leick, Ueber die Leitung der Elektrizität durch dünne Schichten dielektrischer Substanzen. Wied. Ann. Bd. 66, S. 1107 ff.) Der Widerstand nimmt mit wachsender Stromdichte in gleicher Weise ab, und auch in anderen Beziehungen stimmen die beiden überein. Eine Begründung für das Verhalten konnte auch dort nicht gegeben werden.

Besonders auffallend ist die Analogie der Eigenschaften des Uebergangswiderstands mit dem Widerstand des elektrischen Lichtbogens. Die Abhängigkeit von der Stromstärke ist bei beiden vollkommen gleicher Art, und ebenso zeigt sich bei Lichtbogen zwischen Kohlen und Metallen eine Polarität. Hier ist der Widerstand bei der Stromrichtung Metall nach Kohle der kleinere, die Polarität ist also gleich der des Uebergangswiderstands bei ruhendem Ring.

Die vorliegende Arbeit ist im elektrotechnischen Institut der technischen Hochschule zu Karlsruhe entstanden. Dass ich mich mit dem behandelten Gegenstande beschäftigt habe, verdanke ich einer Anregung des Herrn Hofrat Prof. E. Arnold, der mich auch bei der Durchführung der Versuche stets aufs freundlichste mit seinem Rat unterstützt hat. Ich bin ihm dafür zu grossem Danke verpflichtet.

Karlsruhe, September 1902.

Max Kahn.

